

COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES
COMMUNAUTÉ EUROPÉENNE DU CHARBON ET DE L'ACIER

RECUEILS DE RECHERCHES CHARBON

FORMATION PAR ENLEVURE

Technique minière

Recueil
N°

39

LUXEMBOURG 1971

Aux termes de l'article 55, alinéa 2, c, du traité instituant la Communauté européenne du charbon et de l'acier, la Commission encourage la recherche intéressant le charbon et l'acier, notamment en accordant des aides financières. La présente brochure rend compte de l'exécution et des résultats de l'un de ces projets de recherche.

En conséquence du traité de fusion du 8 avril 1965, la Commission unique des Communautés européennes exerce les pouvoirs et les compétences dévolus à l'ex-Haute Autorité.

FORATION PAR ENLEVURE

Contribution à la mise au point de machines
de traçage en roches dures abrasives par une attaque de la
roche favorable du point de vue technique de fragmentation

Les essais qui font l'objet de ce rapport ont été effectués
à l'«Institut für Bergbaukunde und Bergwirtschaftslehre» de
l'Université Technique de Clausthal

Directeur de l'Institut : o. Prof. Dr.-Ing. G. DORSTEWITZ
Rédacteur : Dipl.-Ing. H. HENDRIKS

TABLE DES MATIERES

	Page
Symboles utilisés dans les formules	I
<hr/>	
1. Bases et buts du projet de recherches	1,
1.1 Une attaque plus efficace pour le fraisage de roches dures abrasives	1
1.2 La réalisation technique et les buts de recherche qui en découlent	5
2. Construction et mise à l'épreuve des dispositifs d'essai	14
2.1 L'installation d'essai	14
2.11 Le banc d'essai de fraisage	15
2.12 La technique de mesure et d'enregistrement	20
2.13 Difficultés lors du montage de l'installation d'essai	24
2.2 La roche d'essai	26
2.3 Les molettes coupantes	29
3. Résultats des recherches	33
3.1 Définitions	33
3.2 Dépouillement du rapport des mesures	35
3.3 La vitesse de découpe	40
3.4 La courbure de la trajectoire de coupe	42
3.5 Choix de la forme des molettes coupantes	43
3.6 La disposition des molettes coupantes	46
3.61 Le fraisage en présence d'une surface libre	48
3.62 Molettes coupantes étagées	56
3.63 Molettes coupantes disposées dans un même plan	61
3.64 Confection d'une entaille	64
3.7 Résumé des résultats expérimentaux les plus importants	66
4. Application des résultats d'essais à différentes formes de tête de fraisage	69
4.1 Formes de têtes de fraisage avec trajectoires concentriques des outils de coupe	70
4.11 Bases de calcul	70
4.12 Tête de coupe plane et conique	72
4.13 Tête de fraisage profilée en W	76

.../...

	Page
4.14 La stabilité directionnelle	80
4.2 Têtes coupantes avec porte-outils en rotation, du type planétaire	84
4.21 Le calcul des conditions de découpe et de la vitesse de creusement	84
4.22 Le calcul des efforts et des moments agissant à la tête de fraisage	89
4.23 Influence des conditions de découpe	94
4.24 Influence de la configuration de la tête de fraisage	97
4.3 Comparaison résumée des différentes formes de tête de fraisage	103
5. Conclusion	106
°	
° °	
Littérature	108
Annexes	110

Symboles utilisés dans les formules

a_r	Nombre de molettes coupantes sur un porte-outils
a_s	Nombre de trajectoires concentriques de coupe
$a_1 ; a_2$	Coefficients de régression
A	Surfaces
b	Largeur d'enlevure
c	Rapport entre les nombres de tours du porte-outils et de la tête coupante
f	Degré de liberté
F	Effort
F_{aa}	Effort de contrainte agissant axialement
F_{as}	Effort de contrainte à action latérale
F_e	Effort de pénétration
$F_{e, r}$	Résultante de l'effort de pénétration et de l'effort de roulement
F_f	Effort de dégagement interne
F_r	Effort de roulement
F_s	Effort de coupe
F_{st}	Effort d'appui
F_u	Effort périphérique

.../...

F_v	Effort de poussée
F_{ve}	Participation de l'entaille à l'effort de poussée
F_{vt}	Participation d'un porte-outils à l'effort de poussée
F_x	Composante de l'effort de coupe suivant l'axe des x (intervient dans le couple de la tête coupante)
\bar{F}_f	Valeurs moyennes des composantes de l'effort de coupe F_f , F_r , F_x dans la zone d'attaque φ_e d'une molette coupante
\bar{F}_r	
\bar{F}_x	
\bar{F}_t	Valeur moyenne d'un effort agissant au porte-outils
\bar{F}_{φ_e}	Valeur moyenne d'une composante de l'effort de coupe dans la zone d'attaque φ_e d'une molette coupante
m_{a_1} m_{a_2}	Erreur moyenne des coefficients statistiques a_1 , a_2
M	Moment d'un effort, couple
M_k	Couple de la tête coupante
M_{kt}	Participation du porte-outils au couple de la tête coupante
M_t	Couple d'un porte-outils
n_k	Vitesse de rotation de la tête coupante
n_t	Vitesse de rotation d'un porte-outils

.../...

P	Puissance
P_m	Puissance motrice effective de la machine
P_k	Puissance motrice effective sur la tête coupante
P_t	Puissance motrice effective sur un porte-outils
r_b	Rayon de la voie creusée (= rayon de la tête coupante)
r_k	Distance entre les centres des porte-outils et de la tête coupante
r_t	Distance entre les centres des molettes coupantes et des porte-outils
r_{ts}	Rayon du cercle de coupe d'un porte-outils
s	Hauteur de redan
s_1	Hauteur de redan de la lère trajectoire de coupe à côté de l'entaille
S	Sécurité statistique
t	Profondeur de pénétration
t_{max}	Profondeur maximale de pénétration sur une trajectoire de coupe cycloïdale
t_o	Limite supérieure de la profondeur de pénétration, à laquelle on atteint une charge de molette déterminée
$t_s ; f$	Valeur-seuil de la "Répartition de Student" relevée sur les tables statistiques, pour la sécurité statistique S et le degré de liberté f .

.../...

v_b	Vitesse de fraisage (ou de creusement)
v_s	Vitesse de coupe
W	Energie
W_{spez}	Consommation énergétique spécifique
z	Nombre de molettes par trajectoire de coupe pour une tête coupante à trajectoires concentriques
z_t	Nombre de porte-outils par zone planétaire
α	Angle conique de la tête coupante
φ	Angle caractérisant la position d'une molette coupante sur un porte-outils
φ_e	Angle caractérisant la zone d'attaque d'un porte-outils

1. Bases et buts du projet de recherches

1.1 Une attaque plus efficace pour le fraisage de roches dures abrasives

Dans l'industrie charbonnière Ouest-Européenne, on recherche depuis longtemps déjà, avec beaucoup d'intérêt, comment on pourrait creuser mécaniquement et économiquement les galeries au rocher. Pourtant, parmi les machines de creusement en roche ferme et abrasive actuellement disponibles, jusqu'à présent aucune n'a trouvé emploi dans l'industrie charbonnière à la suite d'une application d'essai. Mais on peut invoquer principalement les raisons suivantes : les machines pour roche dure, nécessairement lourdes de construction, sont aujourd'hui encore fort peu adaptées aux conditions particulières de la mine. La mine demande des machines maniables, faciles à monter et à transporter. Ce n'est que depuis tout récemment qu'aux Etats-Unis, on construit des machines de creusement pour roches dures abrasives en accordant plus d'attention à ces exigences de la mine (9) ^{*)}. La carence en machines de mine pour roche dure peut cependant s'expliquer plus valablement par le fait que des roches réellement dures et abrasives, comme on en rencontre dans les galeries au rocher de la mine, sont actuellement découpables au prix de rendement très mauvais et de dépenses élevées en outils. Aussi longtemps qu'on n'atteint pas des rendements au creusement et des dépenses en outils nettement plus favorables, il faut renoncer à creuser les galeries au rocher mécaniquement et économiquement, étant donné les conditions aggravantes de la mine.

Le pas le plus important et le plus décisif vers le creusement mécanisé et économique des galeries au rocher a été fait en améliorant la nature et le processus d'attaque de la roche.

.../...

*) Les chiffres cités se rapportent à la bibliographie à la fin du rapport.

Les taillants à molettes classiques sollicitent principalement la roche à la compression. Par expérience et suite à de nombreux essais, ce mode de sollicitation s'est avéré le plus défavorable que l'on puisse concevoir, si l'on veut amener la roche à se rompre (4). Toutes les roches dures abrasives sont des matériaux fragiles, avec des résistances à la traction et au cisaillement très faibles par rapport à leur résistance à la compression. Lors de l'attaque par les outils de creusement, cette propriété de la roche mérite d'être exploitée plus amplement qu'autrefois. Malheureusement, aucune solution techniquement sensée ne conduit à exploiter directement et exclusivement ces faibles résistances à la traction et au cisaillement. Cependant, lors de la découpe avec taillants à molettes, on peut, en créant une face libre supplémentaire dans la roche, influencer le processus de rupture ; dès lors, et dans une mesure plus importante que par les taillants à molettes usuels, la sollicitation au cisaillement souhaitée est appliquée à la roche, en plus de la sollicitation inévitable à la compression. Il existe un taillant techniquement très simple, capable d'attaquer la roche de cette manière, et résistant au mieux à l'usure par évitement des mouvements relatifs entre roche et outil. C'est un taillant à molettes comportant une seule arête coupante en forme d'anneau. La figure 1 montre comment travaille cette molette coupante par fraisage en présence d'une face libre.

La figure 2 met en évidence l'analogie profonde entre un semblable processus de découpe et la découpe au moyen d'outils fixes en métal dur (ne roulant pas sur la surface), actuellement utilisés avec succès en roches non abrasives.

.../...

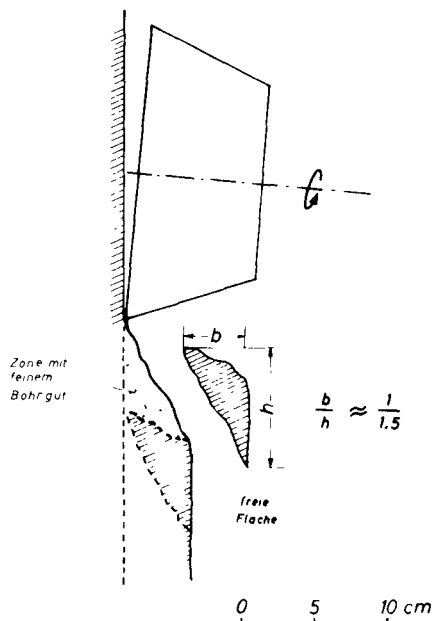


Figure 1

Mode de travail d'une molette coupante en présence d'une face libre.

A_b surface de rupture

A_f face libre

Forme du copeau cisailé :

Largeur b : Hauteur $h \approx 1 : 1,5$

Zone mit feinem Bohrgut = Zone à fins débris de forage

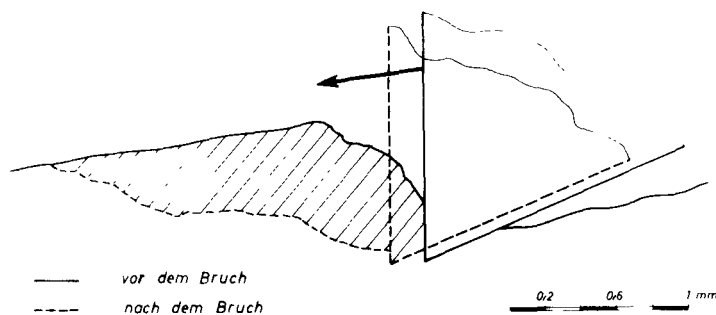


Figure 2 : Libération d'un copeau cisailé, par écaillage au moyen d'une arête tranchante en métal dur (d'après GOODRICH (5))

vor dem Bruch = avant la rupture

nach dem Bruch = après la rupture

Des molettes coupantes, travaillant en présence d'une face libre, ouvrent la route vers un creusement mécanique plus efficace des roches dures abrasives. Cette découverte naquit il y a quelques années à l'"Institut für Bergbaukunde und Bergwirtschaftslehre" de l'Université Technique de Clausthal,

dans le cadre de recherches expérimentales sur un problème particulièrement actuel à l'époque : l'agrandissement des sondages au moyen de taillants à molettes à denture annulaire. A partir de semblables taillants de série, dont on enlevait au chalumeau les dents coupantes jusqu'à ne laisser qu'un anneau, on obtint des molettes capables, dans leur travail d'élargissement des sondages, de tirer parti d'une face libre supplémentaire (Figure 3). La nette supériorité des nouvelles molettes fut confirmée lors des premiers essais de découpe.

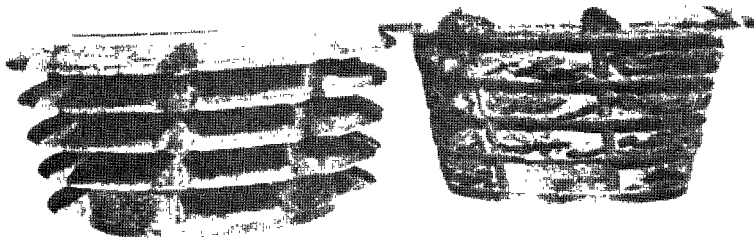


Figure 3 : Taillant à molettes à denture annulaire, pour agrandir les sondages, et molette coupante usinée à partir de ce taillant, à arête coupante unique.

La figure 4 montre schématiquement les différents modes de fragmentation avec taillants à molettes classiques pour élargir les sondages, et avec les molettes coupantes travaillant avec une face libre.

.../...

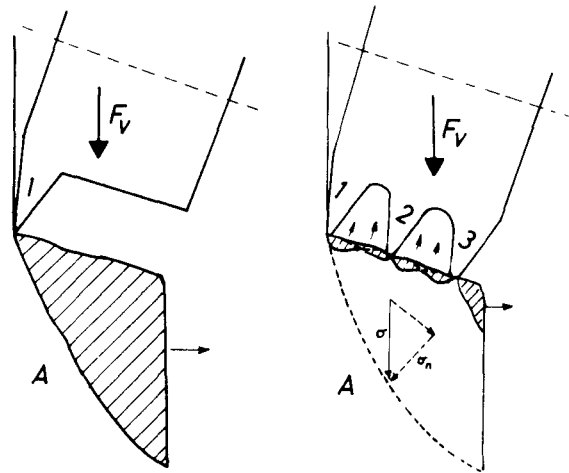


Figure 4 : Action de fragmentation à partir d'une molette à arête coupante unique (à gauche) et à partir d'un taillant à molettes à denture annulaire (à droite), lors de l'élargissement d'un sondage.
A gauche : Surface de rupture A amplement dégagée des tensions normales. Résistance plus faible à l'effort tranchant dans la surface A. Formation d'un gros copeau par cisaillement.
A droite : La poussée F_v fait naître la tension σ par l'intermédiaire des dents coupantes 2 et 3. La composante normale σ_n augmente la résistance à l'effort tranchant dans la surface A. D'où formation non pas d'un gros copeau mais bien de nombreux petits copeaux, par cisaillement.

1.2 La réalisation technique et les buts de recherche qui en découlent

Les considérations sur l'attaque des roches de même que les premiers essais de découpage, couronnés de succès, furent à la base de réflexions plus développées sur l'utilisation technique par les machines de creusement, de cette meilleure attaque des roches au moyen de têtes coupantes nouveau modèle, à haute efficacité. Pour réaliser mécaniquement la découpe par molettes en présence d'une face libre, plusieurs voies sont accessibles ; certaines, sur la base de considérations pratiques paraissent particulièrement avantageuses.

.../...

On songe dès l'abord, comme sur toutes les machines connues avec taillants à molettes, à faire tourner les outils sur des trajectoires de coupe concentriques à l'axe de voie. Cette tête coupante, très simple en principe, permet de provoquer la fragmentation favorable en présence d'une face libre, car on dispose les molettes en étages (Figure 5).

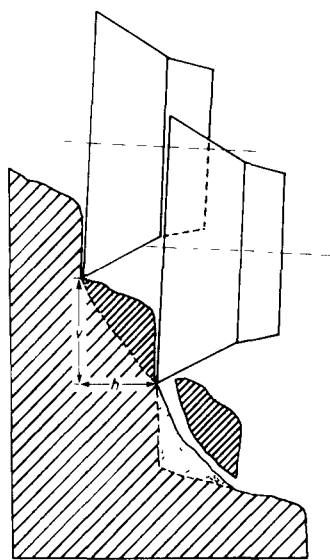


Figure 5

Mode de travail des molettes coupantes disposées en étages

grosse Scherspäne	=	gros copeaux cisailés
Zone starker Gesteinszerkleinerung	=	Zone de forte fragmentation de la roche

große Scherspäne
Zone starker Gesteinszerkleinerung

On obtient alors une tête coupante conique, présentant deux variantes : par rapport à la direction du creusement, la pointe du cône peut se trouver soit vers l'avant soit vers l'arrière. Dans le premier cas, il faudrait créer au centre de la galerie un bouchon en forme de trou pilote central ; ensuite, à partir de celui-ci les molettes coupantes élargissent jusqu'à mise à section complète de la voie. Cette solution se heurte à une difficulté du point de vue technique de fragmentation : l'attaque du centre du front. Vraisemblablement, il ne sera pas possible, sans tête motrice spéciale, techniquement coûteuse, de forer

.../...

le trou central à une vitesse aussi élevée que celle atteinte par les molettes coupantes étagées. Les problèmes qui surgissent dans le cas d'une entaille au centre de la galerie, peuvent être érudés, si l'on créait l'entaille préalable sous forme d'une rainure au périmètre de la galerie, et si inversément les molettes étagées attaquaient un noyau rocheux vers le centre de la galerie. Ce cas cependant suscite un nouvel inconvénient de poids : lors de travaux de réparation et d'entretien, notamment lors de la vérification et du remplacement des taillants à molettes, la tête coupante est retirée du front de voie ; si la roche est fissurée et non homogène - en pratique il faut toujours s'y attendre - on risque que le gros noyau rocheux, découpé tout autour, se détache par son propre poids, et ne cause alors des difficultés notables lors de la reprise du creusement. En outre, l'entaille centrale et la périphérique offrent le même inconvénient : la tête coupante s'étire fortement suivant l'axe de la galerie, gênant ainsi le chargement des déblais ; elle peut aussi, selon les circonstances, rendre les machines moins maniables. Pour éliminer les inconvénients cités ou tout au moins les réduire à une importance supportable, la solution la plus opportune semble être une tête coupante à profil en W, ainsi que la représente la Figure 6.

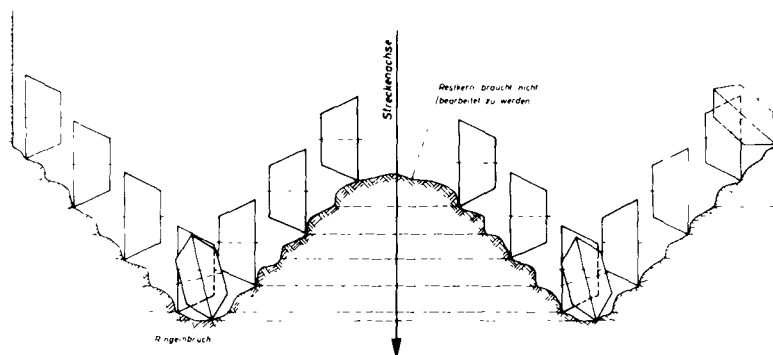


Figure 6 : Principe d'une tête coupante à molettes étagées et à entaille préalable annulaire

Ringeinbruch	= entaille annulaire
Restkern	= noyau résiduel
Streckenachse	= axe de la galerie

.../...

Cette tête coupante présente un cône externe et un interne. Les molettes étagées attaquent un noyau rocheux en direction du centre de voie et en même temps élargissent un grand trou pilote en direction du périmètre de voie.

Sur cette tête coupante, les molettes antérieures revêtent une importance spéciale, car elles font une entaille préalable pour les autres molettes, étagées sur les parties coniques de la tête coupante. Les taillants à molettes classiques pourraient, suivant une technique connue, créer une rainure en guise de pré-entaille, à l'exemple des sondages carottés de puits. Les taillants à molettes doivent alors s'engager avec leurs supports dans la rainure creusée et, par conséquent, être légèrement inclinés pour disposer d'une dépouille (Figure 7). Une telle solution présente des inconvénients notables : la

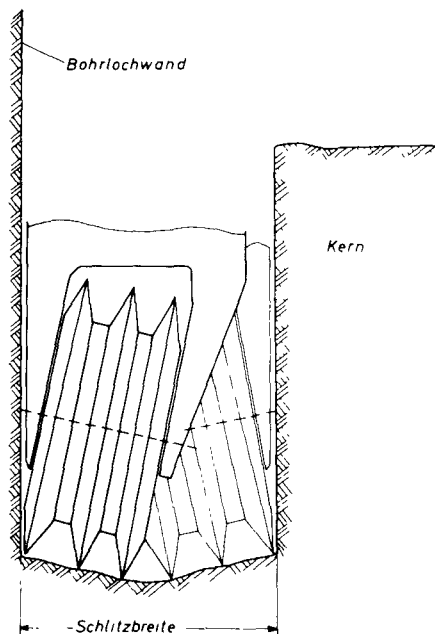


Figure 7

Exemple de création d'une rainure au moyen de taillants à molettes à denture annulaire

Bohrlochwand = paroi du trou de sonde
Kern = noyau
Schlitzbreite = largeur de rainure

construction de l'outil de coupe est fortement gênée dans sa forme par l'exiguïté de l'espace. L'attaque de la roche par ces outils ne peut trouver, du point de vue technique de fragmentation, que des solutions comparativement défavorables.

.../...

Pour obtenir des paliers et des supports suffisamment fermes, la rainure créée devrait avoir une largeur minimale imposée. Par contre, il faut à tout prix s'efforcer de maintenir aussi petite que possible la zone d'attaque défavorable de la roche par les outils. Ces réflexions firent conclure qu'il est bien plus favorable de renoncer à la création d'une rainure en guise de pré-entaille et de doter plutôt les molettes antérieures, comme les molettes coupantes étagées, d'une seule arête coupante annulaire et de n'en modifier que la disposition et la fixation. Le principe d'une telle entaille ressort de la Figure 6. On y montre comment les molettes antérieures créent les premières trajectoires de coupe et comment ensuite, par un léger décalage vers l'arrière des molettes suivantes, on passe aux molettes coupantes régulièrement étagées.

Pour la réalisation technique de la découpe en utilisant l'action favorable d'une face libre, on attache un intérêt prépondérant, pour les raisons exposées, à la tête coupante à profil W, garnie exclusivement de molettes à arête coupante unique. La construction d'une telle tête soulève une série de questions qui ne peuvent être solutionnées que par la voie expérimentale.

Cette tête coupante, comme les têtes coupantes usuelles avec taillants à molettes a pour caractéristique que toutes les molettes attaquent le front en même temps par des trajectoires de coupe concentriques, à intervalle invariable, pré-fixé par la construction. Les conditions de coupe des différentes molettes se différencient par le diamètre de trajectoire, comme par la vitesse de coupe en rapport direct avec celui-ci.

.../...

La vitesse de fraisage est fixée, dans le cadre des efforts mécaniques et des puissances disponibles, par la manière de conduire la machine. A un nombre déterminé de tours, cette vitesse peut être commandée par la poussée exercée - c'est le mode le plus répandu - ou elle peut être déterminée directement par la vitesse de poussée. Une condition nécessaire au succès de la coupe impose qu'à tout moment le couple et la puissance d'entraînement demandés soient disponibles.

Le succès de la coupe et les efforts, les couples et les puissances à fournir pour son obtention dépendent fortement de la dimension choisie pour le décalage étagé des molettes coupantes. En outre la plus grande importance sera consacrée aussi à la disposition et au nombre des molettes antérieures créant l'entaille.

A côté de la tête coupante à molettes étagées et à trajectoires de coupe concentriques, on peut penser à une conception toute différente de la tête qui permet elle aussi de tirer parti, au moyen de molettes coupantes, de l'action favorable d'une face libre. Comme sur les machines équipées avec succès d'arêtes coupantes en métal dur, travaillant donc surtout les roches non abrasives, on pourrait aussi disposer des molettes coupantes sur des porte-outils en rotation autour de l'axe de la voie, à la manière d'un mouvement planétaire. Pour l'obtention d'une face libre, les porte-outils sont fixés avec un dévers. La Figure 8 montre la construction de principe d'une telle tête coupante. En opposition au cas d'une tête coupante dont les outils se déplacent sur des trajectoires concentriques de coupe, le front de galerie peut maintenant être travaillé au moyen de quelques taillants seulement, théoriquement même avec un seul outil. Les taillants à molettes parcourent des trajectoires cycloïdales, le long desquelles la profondeur de pénétration d'une molette varie continûment et périodiquement entre 0 et un maximum

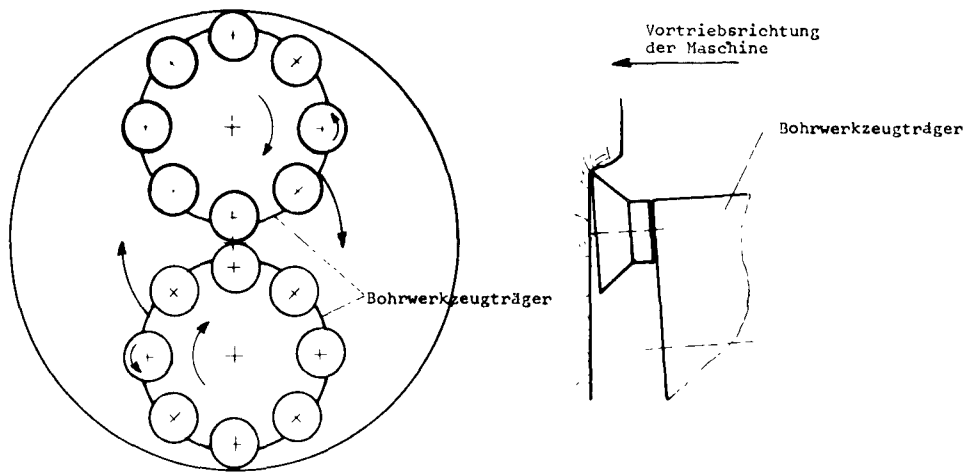


Figure 8 : Principe d'une tête coupante avec porte-outils en rotation autour de l'axe de galerie, à la manière d'un mouvement planétaire

Bohrwerkzeugträger	= porte-outils
Vortriebsrichtung der Maschine	= sens du creusement de la machine

tandis qu'elle est constante sur une tête coupante à trajectoires concentriques de coupe. Par contre, sur une tête coupante à porte-outils en mouvement planétaire, la vitesse de coupe de tous les outils est à peu près constante.

Une tête coupante à porte-outils planétaires présente, par rapport à une tête coupante à trajectoires concentriques, plusieurs avantages du point de vue technique de coupe : toutes les molettes travaillent à la même vitesse de coupe, parcourent le même chemin et sont en moyenne soumises aux mêmes efforts. Les molettes s'usent donc de façon égale. Elles peuvent bénéficier à fond de l'action favorable d'une face libre. La largeur d'enlèvement n'est plus prescrite par la construction mais peut être librement choisie par la conduite de la machine ; ainsi elle s'adapte mieux aux différentes roches. A ces avantages du point de vue technique de coupe s'oppose un inconvénient : une plus faible capacité de la machine et surtout un surcroît de dépenses notable du point de vue technologie de la machine.

Pour pouvoir mieux discuter des deux possibilités techniques particulièrement mises en évidence - étagement des molettes coupantes ou disposition de celles-ci sur des porte-outils en mouvement planétaire - il est inévitable de devoir comparer les rendements au creusement, les efforts, les couples et les puissances installées des deux types de machines. Ces grandeurs, sur une "tête coupante à planétaires", dépendent, comme sur une tête coupante à trajectoires concentriques, de la manière de conduire la machine et de la construction géométrique de la tête coupante ; seulement les relations sont essentiellement plus complexes. Vitesse d'avancement de la machine, nombre de tours et sens de rotation, tant des porte-outils que de l'ensemble de la tête coupante, ont aussi une influence sur le processus de coupe, tout comme les diamètres de la tête coupante et des porte-outils, et le nombre des porte-outils et des molettes. Ces relations peuvent être estimées par une analyse des conditions cinématiques et dynamiques à la tête coupante, si grandeur et direction des efforts de coupe sont connues aux différentes molettes.

Quelle que soit la forme de tête coupante choisie, que les molettes soient disposées sur des porte-outils en mouvement planétaire, ou que étagées elles parcourent des trajectoires concentriques, dans chaque cas des mesures d'effort de coupe aux molettes forment une première investigation importante pour le constructeur. Il faut en déduire, au cours de l'expérience, les conditions de coupe qui règnent, à chaque molette, sur ces têtes coupantes supposées. Le sujet de recherche le plus important doit être l'influence de la disposition des molettes sur le processus de coupe. Il faut chercher à obtenir, pour la tête coupante à planétaires, la présence de la face libre, et pour la tête coupante à molettes étagées, différents nombres de paliers. Pour comparer et apprécier les avantages d'une face libre, il faut aussi étudier le fraisage avec molettes placées sur une tête coupante à trajectoires concentriques dans un même plan, comme c'est

.../...

le cas actuellement sur quelques machines connues de traçage. Enfin il faut prendre en considération la disposition particulière des molettes antérieures d'une tête coupante à profil en W. Ces expérimentations sur les efforts de coupe forment le coeur du projet de recherche. On peut en tirer des conclusions à posteriori sur la conception des outils de coupe et de la tête coupante, sur le dimensionnement de l'ensemble de la machine de même que sur la manière avantageuse de la conduire. Cette voie analytico-déductive, basée sur des mesures à chaque outil de coupe, n'a pas été explorée jusqu'à présent lors de la mise au point de machines à creuser les voies. Il est ainsi possible de fournir au constructeur et aux autres postes intéressés des bases de travail et de décision avant d'entreprendre la construction, riche en risques, d'une nouvelle machine.

D'expériences glanées lors d'essais antérieurs de forage à grand diamètre, nous savons que des recherches sur l'usure des molettes coupantes, au sens restrictif - on entend par là la destruction continue et lente du matériau, à l'arête coupante de la molette - ne sont malheureusement pas possible au banc d'essai, car on ne peut réaliser des longueurs de forage suffisantes sous des conditions d'essais constantes. Connaissant les expériences passées, nous renonçons donc à de semblables recherches, dans le cadre de ce projet. Cependant, elles restent indispensables et primordiales lors d'essais industriels. Les mesures d'effort de coupe dans ce projet de recherche peuvent fournir des premières indications importantes sur la solidité de l'ensemble de l'outil (ce terme pourrait également représenter l'usure au sens élargi).

.../...

2. Construction et mise à l'épreuve des dispositifs d'essai

2.1 L'installation d'essai

En vue d'effectuer les recherches expérimentales, l'"Institut für Bergbaukunde und Bergwirtschaftslehre" de l'Université Technique de Clausthal projeta et construisit une installation d'essai permettant de faire les mesures nécessaires.

Pour pouvoir accomplir des travaux proches de la pratique, c'est-à-dire dont les résultats soient immédiatement transposables à une machine de creusement déductible des hypothèses, le modèle d'essai fut dimensionné pour effectuer des recherches à l'échelle 1 : 1. Cela parut absolument nécessaire, car on est très loin de connaître les lois de similitude du processus de creusement, et nous voulons apprendre à connaître sûrement, par des relations qualitatives, les efforts agissant réellement sur un outil de coupe industriel. Une échelle de modèle 1 : 1 pour le processus de fragmentation signifie que d'une part forme et grandeur de la partie coupante du taillant à molettes essayé doivent coïncider avec la pratique, mais que d'autre part la forme géométrique de la surface rocheuse attaquée, déterminée par la position d'une molette par rapport à sa voisine, et par sa profondeur de pénétration, doit correspondre exactement à la réalité pratique. Pour satisfaire ces exigences, l'investissement en matériel technique doit être important. On ne pouvait reprendre l'expérience acquise lors de la construction d'un stand d'essai pour taillants à molettes, notablement plus petit, effectué à l'Institut même, que ce soit du point de vue expérience pure ou du point de vue modèle à imiter. Aussi la construction, la mise à l'épreuve et l'amélioration de l'installation d'essai prirent un temps notable.

.../...

2.11 Le banc d'essai de fraisage

La Figure 9 montre une vue d'ensemble du banc d'essai. La roche à expérimenter est fixée et mise en rotation sur un plateau provenant d'une installation de sondage à grande profondeur pour le pétrole ; les outils coupants ne subissent que le mouvement d'avance sur un support coulissant en direction verticale. Une telle disposition s'écartant de la réalité provoque des dépenses essentiellement réduites du point de vue constructif ; elle offre en outre de grands avantages du point de vue technique de mesure, car le captage de signaux faibles, en provenance d'éléments de machine en rotation, suscite des difficultés importantes et peut facilement être à la source d'erreurs de mesure.

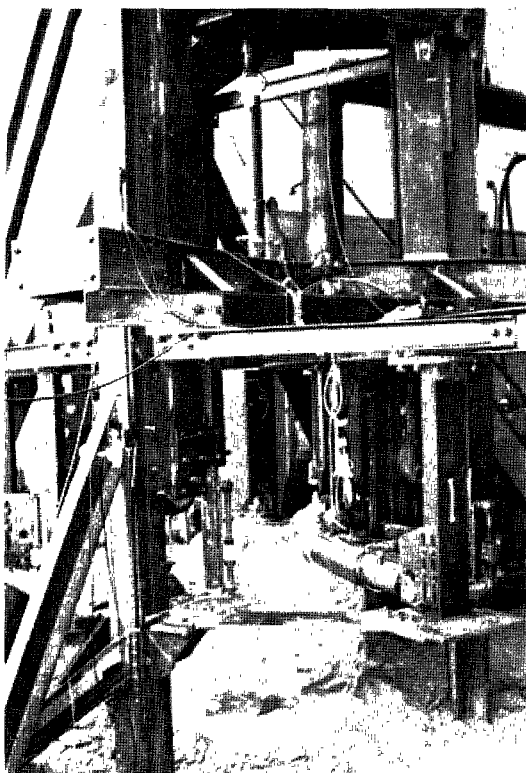


Figure 9

Le banc d'essai de fraisage

L'installation de la roche à expérimenter sur le plateau pivotant exige d'amples préparatifs. Du bloc brut de roche livré sous une forme plus ou moins cubique, il faut d'abord fabriquer un cylindre ayant au maximum un mètre de diamètre et un mètre de hauteur. La Figure 10 montre la confection de ce cylindre.

Pour en augmenter la stabilité, la base non plane est scellée avec du ciment. Il s'est avéré nécessaire d'arrimer le cylindre rocheux, en son centre, sur le plateau pivotant, et ceci au moyen d'une broche.

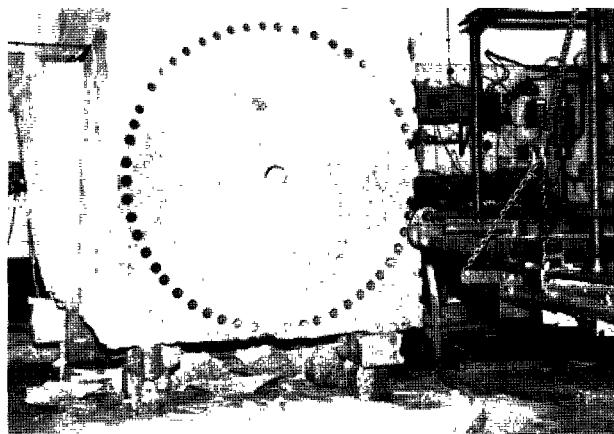


Figure 10 : Confection d'un cylindre rocheux pour les essais de fraisage

Le plateau pivotant est entraîné par une unité hydrostatique à circuit d'huile fermé. Ainsi le nombre de tours du plateau, donc la vitesse de coupe des taillants à molettes, peuvent être modifiés continûment. Tandis que le réducteur du plateau pivotant et le moteur hydraulique à vitesse lente (Figure 11) sont installés en sous-sol dans une cave, le groupe moto-pompe avec réservoir d'huile et appareillage (Figure 12) fut disposé dans le hall d'essai, où il était plus accessible. Un moteur asynchrone de 80 kw avec rotor en court-circuit entraîne une pompe à pistons axiaux de débit continûment réglable. Le débit maximal atteint 270 l/min et la pression maximale de service 250 atü. Le moteur à pistons radiaux en double étoile, à vitesse lente, tourne au maximum à 85 tours/min si la pompe est à pleine charge et développe, à la pression de service la plus élevée, un couple de 1020 kgm. Le réducteur du plateau pivotant réduit le nombre de tours maximal dans le rapport 4 : 1, c'est-à-dire à environ 21 tours/min, tandis que le couple maximal disponible à la roche d'essai monte à environ 4.000 kgm.

.../...

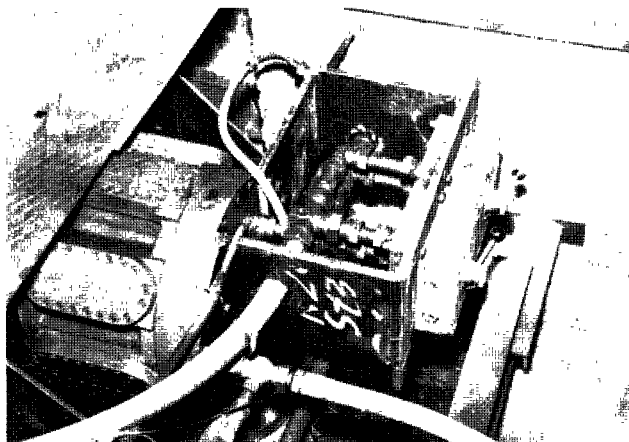


Figure 11 : Moteur hydraulique pour la commande du plateau pivotant

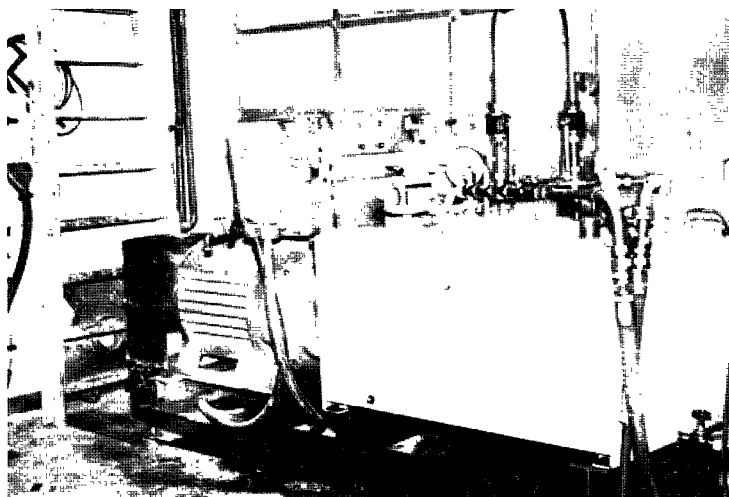


Figure 12 : Groupe moto-pompe pour la commande du plateau pivotant

L'avancement du support des outils de coupe s'obtient par un vérin hydraulique à double effet ayant une course de 1,60 m. Sous la pression maximale en service de 200 atü, ce vérin développe un effort de poussée de 16 T. et un effort de traction de 8 T. Le support coulissant verticalement a un poids propre de 4 T., de sorte que les 3 taillants d'essais à molettes peuvent subir un effort total d'avancement de 20 T. A certains

.../...

moments, si la roche d'essai se fragmente en morceaux plus importants, il faut éviter une descente accélérée du support et maintenir l'uniformité du mouvement d'avance. Aussi a-t-on introduit un réglage du débit dans l'arrivée comme dans le retour de l'huile. La Figure 13 montre l'installation d'alimentation en huile pour le vérin d'avancement, avec réglages du débit et appareillage.

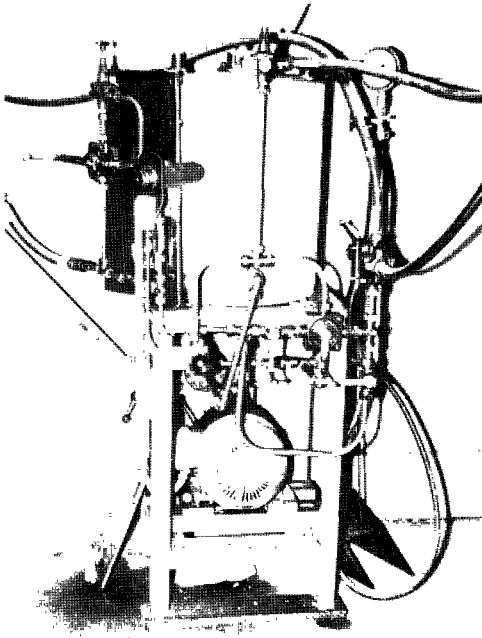


Figure 13
Installation hydraulique
pour l'avancement

L'élément essentiel du banc d'essai comporte les 3 taillants à molettes et leurs suspensions coûteuses, qui servent à réaliser différentes conditions d'essai et à obtenir séparément 3 composantes des efforts de coupe. Il fallait au minimum 3 taillants à molettes, pour plusieurs raisons : ce n'est qu'ainsi que l'on peut simuler l'action de trajectoires voisines de coupe sur la fragmentation par une molette coupante, et les différentes dispositions des molettes coupantes qui sont à étudier. En outre, le contrôle complet des mesures n'est possible qu'avec au minimum 3 taillants à molettes. Enfin, avec 3 taillants à molettes, on peut réaliser une construction statique capable de supporter les efforts introduits dans le dispositif d'essai. La Figure 14 montre un porte-outils avec un taillant d'essai à molettes. Les outils sont emmanchés sur des supports coniques appartenant à leurs axes qui sont montés sur roulements.

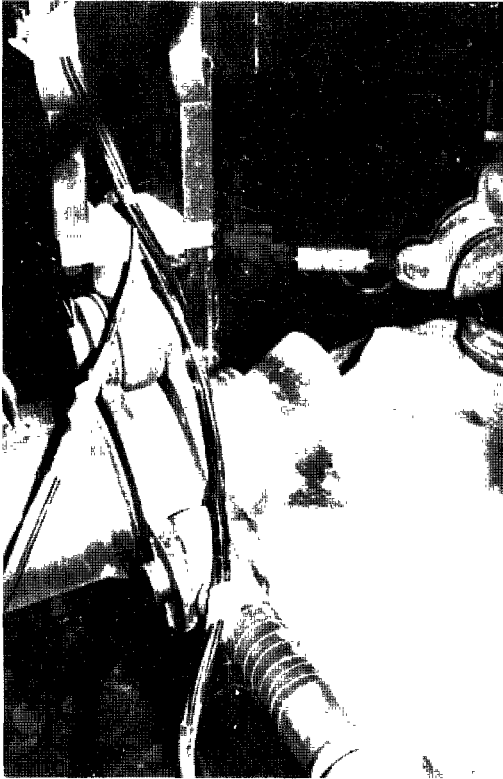


Figure 14

Taillants d'essai à molettes et
porte-outils de coupe

L'axe est supporté radialement par 2 roulements à rouleaux d'une force portante de 15 T. chacun. Le roulement axial reprend également des efforts de 15 T. Ce ferme appui conduit à dimensionner le porte-molettes de manière aussi ample ; de cette façon, on se passe des roulements de série pour taillants à molettes et on se protège contre les dégâts aux roulements en cas de charges élevées. Les 3 porteurs d'outils de coupe peuvent être déplacés indépendamment l'un de l'autre, aussi bien en direction radiale que axiale par rapport au cylindre de la roche d'essai, pour simuler différentes dispositions des molettes coupantes sur une tête coupante supposée. La suspension des porteurs d'outils de coupe fut établie pour que l'effort de coupe agissant au taillant à molettes soit divisé en 3 composantes perpendiculaires entre elles, orientées axialement, radialement et tangentielllement par rapport à la roche à expérimenter. En utilisant une liaison articulée de toute part, on peut séparer avec certitude les différentes composantes de force, sans influence réciproque, et on peut ainsi les mesurer.

2.12 La technique de mesure et d'enregistrement

Les composantes de l'effort de coupe, chaque fois au nombre de 3, sont mesurées, aux 3 taillants d'essai à molettes, au moyen de jauges de contrainte. Cette technique est exposée en détail dans la littérature spécialisée. Les brochures des firmes offrent une introduction rapide et en général suffisante pour l'utilisation pratique (10). Dans ce rapport, on renoncera donc à exposer en détail la technique de mesure par jauges de contrainte. On se contentera de jeter un coup d'oeil sur les particularités des dispositifs choisis pour la mesure et l'enregistrement.

Les capteurs de mesure furent tournés dans notre propre atelier, en acier St 37. Les capteurs, destinés aux composantes de l'effort de coupe dans les directions tangentielle et axiale de la roche à essayer, sont soumis à la traction ; au contraire, les capteurs destinés à la composante radiale sont soumis à la compression. A cause des pointes de charge élevées que l'on rencontre, les sections des capteurs furent choisies comparativement grandes. Pour obtenir, déjà pour de faibles efforts, un signal de mesure fort autant que possible, les ponts collés formés par les jauges ont été montés avec chaque fois 2 jauges actives et 2 passives, comme des ponts purs. Les jauges passives, comme les jauges actives longitudinalement disposées, sont collées sur le capteur de mesure, mais dans le sens transversal (Figure 15). Par contraction latérale (respectivement dilatation) du capteur, les jauges passives délivrent ainsi un faible signal de mesure et renforcent la sensibilité du pont de mesure. En outre, par cette disposition, elles compensent les tensions de flexion et les influences de température.

Les différents capteurs de mesure subirent un double étalonnage. Les valeurs de comparaison furent obtenues une première fois par calcul, à partir du module d'élasticité du matériau du capteur, de la section du capteur, et des caractéristiques des jauges fixées sur lui par collage ; par ailleurs, les mêmes valeurs furent obtenues expérimentalement au moyen d'une presse d'essai. Dans chaque cas, on obtint un très bon accord entre l'étalonnage théorique et l'expérimental.

.../...

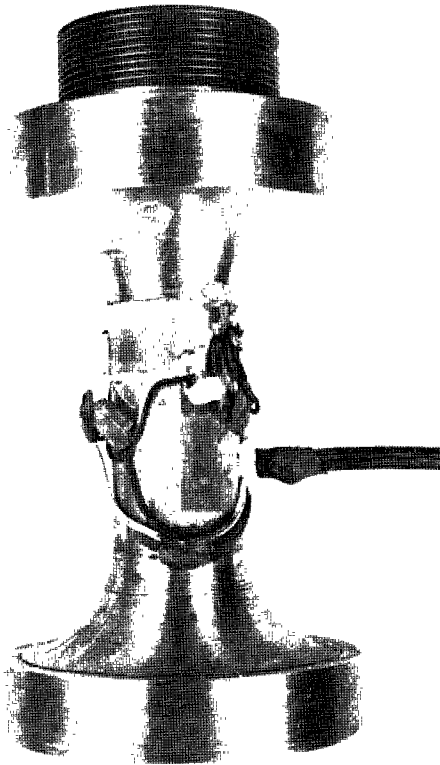


Figure 15

Capteur de mesure avec jauges de contrainte appliquées par collage

Les entrées et sorties de chaque pont de jauges sont chaque fois réunies aux amplificateurs de mesure par un câble protégé et mis à la terre. On dispose de 2 amplificateurs de mesure à courants porteurs et à 6 canaux Hottinger KWS/6 T-5, de sorte que 12 grandeurs à mesurer peuvent être traitées simultanément.

Les signaux de sortie amplifiés et démodulés des amplificateurs de mesure sont enregistrés sur papier sensible à la lumière. Pour cela on utilise 2 oscillographes à rayon lumineux, avec chacun 25 pistes enregistreuses, d'une largeur utile de 300 mm ou de 150 mm respectivement (Hartmann & Braun Lumiscript 25-300 et 25-150).

Chaque grandeur à mesurer est enregistrée simultanément sous forme non amortie, avec son déroulement temporel exact, et sous sa forme amortie qui en est une moyenne dans le temps. On branche à cet effet, entre la sortie d'un canal d'un amplificateur de mesure et l'entrée de l'enregistreur, un élément adaptateur et amortisseur, construit par nous. Le circuit électrique entre amplificateur et enregistreur est divisé en 2 circuits parallèles, dont l'un comprend des éléments C et R pour amortir le signal de mesure. Dans les 2 circuits, l'ampérage maximal

.../...

peut être abaissé à volonté au moyen d'une résistance variable ; ainsi, indépendamment du degré de sensibilité réglé à l'amplificateur, la déviation maximale des galvanomètres enregistreurs peut être modifiée à volonté ; ainsi, à tout moment, on peut choisir une échelle commode pour l'interprétation de l'évolution des efforts enregistrés.

Dans la méthode exposée, en tout 9 efforts élémentaires sont mesurés (chaque fois 3 composantes d'effort à chacune des 3 molettes coupantes) et 18 fois enregistrés (chaque effort amorti et non amorti). De même la poussée totale exercée par le vérin d'avancement est mesurée et enregistrée en guise de contrôle. Le système exposé comporte encore un mesurage de contrôle du couple, au moyen de jauges de contrainte. Par ailleurs, ce couple est déjà donné à partir des composantes tangentielles des efforts de coupe. A cet effet, des jauges de contrainte ont été collées sur des bouchons dans la canalisation d'alimentation en huile et dans celle de retour du moteur hydraulique, et ont été étalonnées en fonction de la pression. Elles sont connectées de telle façon que la pression différentielle agissant sur le moteur est mesurée directement ; la caractéristique connue du moteur fournit alors le couple délivré.

A côté des efforts élémentaires mesurés par jauges aux molettes coupantes, la longueur fraisée est la plus importante des grandeurs mesurées. Elle est relevée au moyen d'un potentiomètre circulaire alimenté par batterie, puis directement enregistrée. A partir du chemin parcouru, on peut obtenir simplement la vitesse de fraisage intervenant à chaque instant.

Le nombre de tours du plateau pivotant est capté sur un générateur d'impulsion à l'accouplement entre moteur hydraulique et réducteur du plateau pivotant. La tension du générateur s'indique sur un compte-tours, mais est aussi enregistrée après redressement et adaptation, afin de maîtriser les variations du nombre de tours. En complément, une lampe-éclair s'enclenche dans l'enregistreur à chaque rotation de 120° du plateau, au

moyen d'un commutateur placé à la périphérie du plateau pivotant ; cette lampe produit une ligne transversale sur le papier d'enregistrement. C'est un contrôle supplémentaire du nombre de tours. La fonction principale de ces lignes transversales est de permettre une comparaison rapide et simple des pistes enregistrées et ainsi de faciliter fortement le dépouillement des enregistrements.

Pour synchroniser toutes les valeurs de mesure, sortant sur 2 bandes de papier séparées (2 enregistreurs), un galvanomètre par enregistreur est branché dans un circuit commun alimenté par batterie, qui peut être interrompu à volonté à l'aide d'un commutateur de manoeuvre. Ainsi on marque en même temps sur les 2 bandes des repères en forme d'impulsions galvanométriques. De cette manière, l'instant des faits à retenir peut être marqué en synchronisme pendant la mesure : par exemple l'instant où l'on modifie une condition d'essai ou du passage à un autre degré de sensibilité.

La Figure 16 montre le dispositif de mesure et d'enregistrement rendu déplaçable, avec amplificateur de mesure, éléments d'adaptation et oscillographes à rayon lumineux.

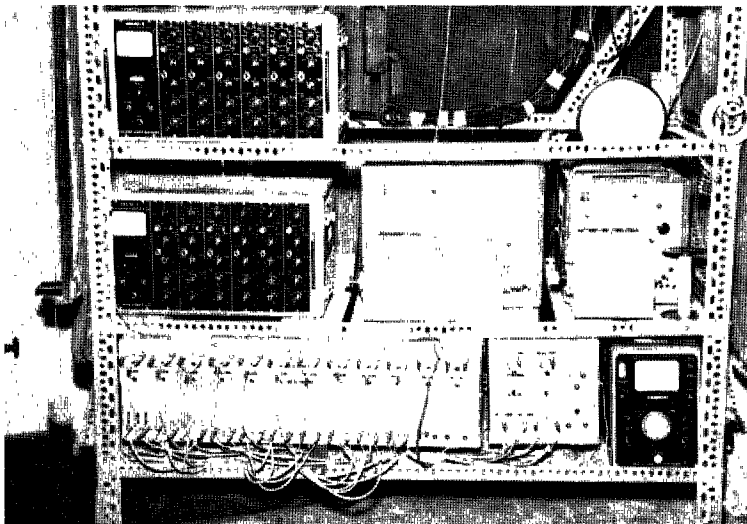


Figure 16 : Appareils de mesure et d'enregistrement

2.13 Difficultés lors du montage de l'installation d'essai

Lors de la construction de la grande installation d'essai il fallut surmonter une série de difficultés imprévisibles lors du projet. Les travaux nécessaires d'amélioration provoquèrent un retard important au démarrage des essais projetés.

Les difficultés rencontrées proviennent de quelques différences déterminantes entre le banc d'essai et la tête coupante d'une machine de creusement. A cause de l'échelle 1 : 1 du modèle, les taillants d'essai à molettes reçoivent les mêmes efforts que les molettes coupantes d'une tête réelle ; cependant la maîtrise de ces efforts rencontre des conditions essentiellement plus défavorables au banc d'essai. Dans la pratique, les taillants à molette sont directement vissés sur une tête coupante massive et forment avec elle un système rigide ; le banc d'essai, lui, exige pour les molettes des suspensions mobiles, répondant en outre aux exigences de la technique de mesure. Il existe une autre différence essentielle entre tête coupante et banc d'essai : c'est l'amplitude des variations relatives de charge, exprimée par le rapport entre valeurs de pointe et valeur moyenne des efforts. Dans une tête coupante, le grand nombre de molettes amène forcément une uniformisation des efforts d'ensemble ; par contre cette tendance à l'uniformisation n'existe pas si l'on n'a que 2 taillants d'essai à molettes. En présence de ces conditions aggravées, et du fait que rien ne permettait de prévoir l'importance des charges, car on manquait de données, il fut presque impossible de respecter avec précision les conditions d'essai instaurées ; les mesures furent donc influencées à un degré inadmissible.

.../...

Déjà lors de la première campagne avec l'installation d'essai, il s'avéra que les fortes variations des composantes tangentiellles des efforts de coupe provoquaient une rotation très saccadée du plateau pivotant. L'unité hydraulique d'entraînement fut alors vérifiée dans son ensemble par le constructeur ; on n'y trouva cependant aucun défaut. Diverses modifications aux canalisations d'huile et aux soupapes n'apportèrent aucun remède. Nous nous décidâmes alors à remplacer le moteur hydraulique d'origine par un moteur notablement plus grand, surdimensionné. Même cette mesure ne connut pas encore le succès escompté. Nous avons alors intercalé un réglage de débit dans le retour de l'huile, immédiatement en aval du moteur hydraulique, afin que, lors du creusement, le moteur hydraulique dispose sans délai de la pression maximale de service, dans le cas où des pointes élevées du couple sont à surmonter. C'est seulement après cette modification que la rotation du plateau atteignit une régularité satisfaisante.

Les composantes radiales de l'effort de coupe (par rapport au bloc d'essai) s'avérèrent plus importantes que prévu. Sous leur action, les molettes coupantes s'écartèrent de la trajectoire imposée. Pour accroître la rigidité du support coulissant, nous en fîmes un système annulaire fermé. Le guidage du support put être amélioré en y disposant des rouleaux supplémentaires de guidage avec robustes roulements à billes, à hauteur de la ligne d'action des efforts radiaux par rapport à la roche. En outre, un renforcement de l'étalement au châssis fixe du guidage s'avéra nécessaire pour réduire la flexion à un minimum. Les capteurs de mesures pour efforts radiaux et leurs appuis durent être remplacés et renforcés, après l'apparition de déformations plastiques par surcharge.

Sous l'action des efforts orientés axialement par rapport à la roche, des morceaux de roche plus importants se rompent sporadiquement ; donc, pendant le processus de creusement, il

.../...

arrive de temps à autre que les molettes coupantes soient libres d'effort, et même parfois toutes 3 en même temps. Sous l'influence de la poussée, l'avancement donné par le vérin hydraulique est alors accéléré et ainsi augmente brusquement la profondeur d'attaque des molettes coupantes dans la roche. Le processus de creusement résultant est très irrégulier et n'est soumis à aucun contrôle. Au point que cela peut aller jusqu'au blocage du plateau pivotant. Pour régulariser l'avancement, il fut nécessaire d'introduire après coup des appareils régulateurs dans le système hydraulique d'avancement.

2.2 La roche d'essai

La confection de blocs rocheux appropriés aux essais, de dimensions obligatoirement importantes, suscita de grosses difficultés et retarda davantage le démarrage de l'essai.

Des premiers tests de creusement eurent lieu avec un grès tendre provenant d'une carrière voisine, mais ne convenant pas pour les recherches ultérieures. On utilisa, comme première roche véritable d'essai, une Grauwacke dure du Dévonien. Cette roche présentait, à des intervalles assez grands, des intercalations fissiles très minces ; celles-ci, étant donné leur minceur et leur repérage aisé, ne furent pas considérées comme gênantes, lors du choix de la roche. Au cours de l'essai de fraisage, il s'avéra cependant que même de faibles efforts de coupe suffisaient à provoquer une séparation complète du bloc rocheux suivant ces intercalations. En outre, l'intervention des molettes coupantes créait très souvent des fissures aboutissant à l'arrachage de morceaux rocheux gros et irréguliers. Ces fines fissures, imperceptibles avant le creusement, résultent vraisemblablement des travaux à l'explosif lors de l'abattage du bloc.

.../...

Lors du choix de la roche d'essai suivante, on prit donc soin qu'elle ne présentât aucune hétérogénéité identifiable et qu'elle provînt d'une carrière de pierres de taille où l'on n'utilise pas l'explosif. Nous choisîmes un grès Triasique existant dans les environs immédiats. Cette roche microscopiquement très homogène révéla cependant au cours du creusement une stratification normale à la direction d'avancement des molettes, très prononcée, fine et régulière. Le bloc rocheux s'exfolia jusqu'au coeur et se brisa finalement en quelques grandes plaques.

Nous nous remîmes donc à la recherche d'un matériau notablement plus solide et en outre très compact. Il s'agissait d'un calcaire gréseux Jurassique de grande résistance. Cette roche absolument dépourvue de fissures et de stratification ne se fragmenta pas en gros morceaux (pour la première fois), même sous de plus fortes sollicitations. Les vitesses de creusement et les efforts de coupe, qui varient fortement sous des conditions constantes d'essai, firent cependant ressortir que cette roche possédait une structure hétérogène difficilement identifiable à l'oeil nu et que donc, malgré ses autres avantages, elle ne convenait pas pour des essais comparatifs.

Ces expériences montrèrent que toute une série de conditions sont à imposer à la roche d'essai. Pour répondre aux exigences du projet de recherche, elle doit être ferme et abrasive, homogène et non stratifiée ; elle ne peut présenter de fissure ni de solution de continuité dues à des sollicitations tectoniques ; elle doit en outre être abattue en gros blocs, sans recourir à l'explosif. La conjonction de toutes ces conditions limite très fortement le nombre des gisements rocheux à prendre en considération. Cela nous incita à intensifier la recherche de roches appropriées à l'essai et à étendre

.../...

ces recherches à toute la République Fédérale. Parmi les quelques gisements à retenir, nous en avons finalement sélectionné trois :

1. Grès carbonifère de la Ruhr (Mülheim/Ruhr)
2. Schiste quartzitique Dévonien (Lindlar/Région de Berg)
(cette roche est dénommée Grauwacke par le fournisseur)
3. Grès bigarré (Milttenberg/Main)

Ces 3 roches sédimentaires très quartzifères, de résistance différente, furent étudiées par la section Minéralogie-Pétrographie du Steinkohlenbergbauverein à Essen. Des détails plus circonstanciés sur la structure de ces roches peuvent être trouvés dans le rapport d'étude (Annexe 1.1).

Etant donné les grandes difficultés à trouver une roche sédimentaire appropriée aux essais, nous avons, déjà de bonne heure, effectué des fraisages-tests avec le granit de Wurmberg disponible dans les environs immédiats de Clausthal. Cependant, les premiers essais en granit échouèrent complètement à cause des arêtes de coupe des outils, de résistance défectueuse. Plus tard, nous disposâmes de molettes coupantes en métal dur, de fabrication spéciale améliorée ; à ce moment, les essais de fraisage, même dans cette roche, furent couronnés de succès. L'annexe 1.2 contient une description minéralogique et pétrographique de cette roche.

Malgré un choix très attentif des roches d'essai, diverses difficultés ne peuvent être contournées lors de l'exécution des essais de fraisage dans le cadre de ce projet de recherche, qui sont proches de la pratique et s'effectuent sur des roches naturelles. Les essais, qui imposent l'application à la roche d'efforts importants, présentent, même avec une roche aussi homogène et aussi compacte que le granit, le danger que le bloc rocheux, fixé sur le plateau pivotant et libre de contraintes sur toutes ses faces, ne se fragmente en gros morceaux et ne devienne ainsi inutilisable pour des mesures ultérieures. A la suite de

.../...

nos efforts ardues pour disposer de roches d'essai convenables, nous sommes convaincus qu'on ne réussira pas à trouver des roches naturelles qui soient foncièrement compactes et homogènes. Au contraire, la fragmentation incontrôlée de blocs rocheux libres de contraintes, en présence d'une forte sollicitation mécanique, constitue un comportement à la rupture, inéluctable pour toute roche naturelle. Il n'est donc pas possible d'effectuer les essais selon un schéma pré-déterminé avec précision, et rigide, dans lequel toutes les conditions d'essai intéressantes sont respectées suivant un ordre rigoureux. On est au contraire forcé d'adapter l'exécution du programme d'essai à la résistance des différents blocs rocheux. Fréquemment certaines mesures ne peuvent être obtenues à cause de conditions d'essai qui sollicitent très fortement la roche. Cependant, en exploitant synthétiquement toutes les conditions d'essai réalisables, on peut obtenir des indications, valables également pour des domaines non étudiés.

2.3 Les molettes coupantes

Enfin, à la suite des difficultés avec l'installation et les roches d'essai, des problèmes imprévus se présentèrent aussi dans la confection des taillants à molettes.

Lors du premier fraisage-test dans le granit, les molettes coupantes utilisées s'émoussaient déjà après 15 cm d'avancement. Ce résultat était fort surprenant, car ces mêmes taillants à molettes avaient supporté sans usure apparente tous les essais de fraisage dans les roches testées auparavant. Cet exemple intéressant montre clairement combien il est difficile de prévoir l'usure d'une roche par un mode déterminé d'attaque. Si l'on compare les résistances à la compression et les teneurs en quartz des roches fraisées auparavant avec celles du granit,

.../...

on en arrive au résultat que dans ce cas les deux paramètres ne peuvent représenter l'aptitude de la roche à s'user, même de façon approximative. Ainsi par exemple, le calcaire Jurassique dur avait une résistance à la compression plus élevée que le granit, et la Grauwacke, de résistance très peu inférieure à celle du granit, avait une teneur plus élevée en quartz. Les phénomènes d'usure observés, à savoir d'abord des ruptures fragiles sporadiques dans le métal dur rapporté par soudure, puis la déformation du matériau de base et du matériau d'apport restant, décèlent l'existence de pressions très élevées, étroitement localisées, explicables uniquement par la structure serrée et cristalline du granit, avec ses composants minéraux durs.

Après l'échec du premier jeu de taillants à molettes, on entama aussitôt la confection de différentes nouvelles molettes coupantes, à partir d'autres qualités d'acier et d'autres apports par soudure. Pour ne pas devoir interrompre trop longtemps les essais, les molettes coupantes émoussées furent réaffutées dans notre atelier. Sous les conseils d'un spécialiste en soudure consulté, nous essayâmes plusieurs combinaisons de matériaux pour l'application de la soudure sur l'arête de coupe. A ce propos, des différences très chiffrables dans le comportement à l'usure purent être établies ; cependant, même en adoptant la meilleure combinaison de matériaux, la solidité était trop faible pour permettre l'exécution d'un programme d'essai raisonné. Les nouvelles molettes coupantes avec métal dur rapporté par soudure, livrées entre-temps par le fabricant de molettes, n'apportèrent elles aussi aucun succès. Les phénomènes d'usure connus réapparurent chaque fois. Nous fîmes l'expérience que des apports en métal dur protègent certainement bien contre l'usure au frottement, mais ne peuvent supporter les pressions élevées de contact lors du fraisage avec molettes coupantes en roche réellement dure et abrasive.

.../...

Les essais décourageants de fraisage avec arête coupante renforcée amenèrent bientôt à utiliser des molettes avec arête coupante en acier trempé ou à plaquettes de carbure. Ce chemin conduisit alors au succès. L'arête coupante trempée permit dès la première tentative d'effectuer un essai de fraisage en granit, au cours duquel les déformations en question n'apparurent pas. En observant de près l'arête coupante, on put cependant conclure que même une telle molette présenterait une usure marquée après un certain nombre d'essais en granit, et n'est donc pas adaptée à cette roche. Le premier jeu de molettes coupantes à plaquettes soudées en métal dur eut un résultat négatif. Il se produisit des ruptures fragiles à l'arête en métal dur attaquant la roche et en même temps quelques plaquettes de carbure se détachèrent suivant leur brasure. Un autre matériau de brasage, un autre procédé de brasage et une modification de la forme des plaquettes à leur arête coupante éliminèrent ces phénomènes. Grâce à ces molettes carburées améliorées, il fut enfin possible de fraiser le granit sans encombre.

Toutes les études de l'effort de coupe portèrent exclusivement sur 2 types de taillants à molettes, l'un avec arête coupante en carbure et l'autre avec arête en acier trempé. Les molettes carburées servaient surtout aux essais de fraisage en granit, et les taillants à molettes en acier furent appliqués à toutes les autres roches d'essai. Les Figures 17 et 18 montrent les taillants à molettes utilisés, qui ont subi tous les essais sans usure mesurable. Les molettes à arête coupante en acier avaient un diamètre de 200 mm, leur angle de taillant atteignait 65° et l'arête coupante était arrondie au rayon de courbure de 3 mm. Les molettes carburées par contre avaient un diamètre de 150 mm seulement. Les plaquettes carburées

.../...

présentaient un angle de taillant de 90° et leur arête coupante était limée en forme de biseau sur 2 mm de largeur.

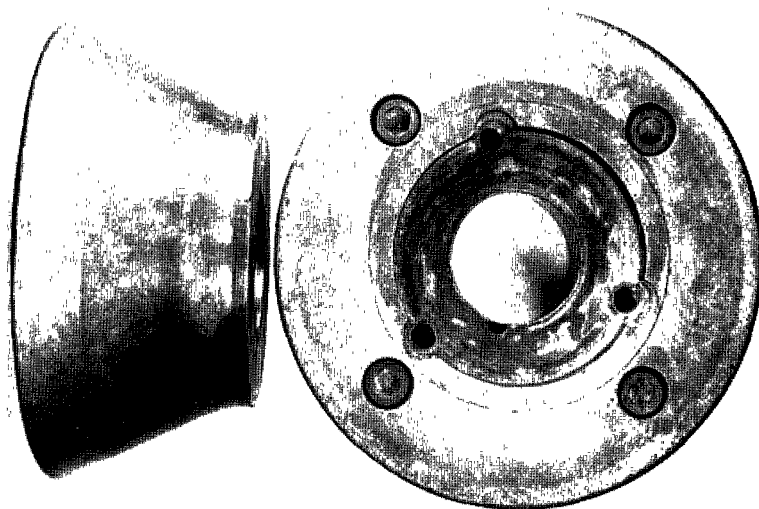


Figure 17 : Molette coupante d'essai avec arête coupante en acier trempé (200 mm de diamètre)

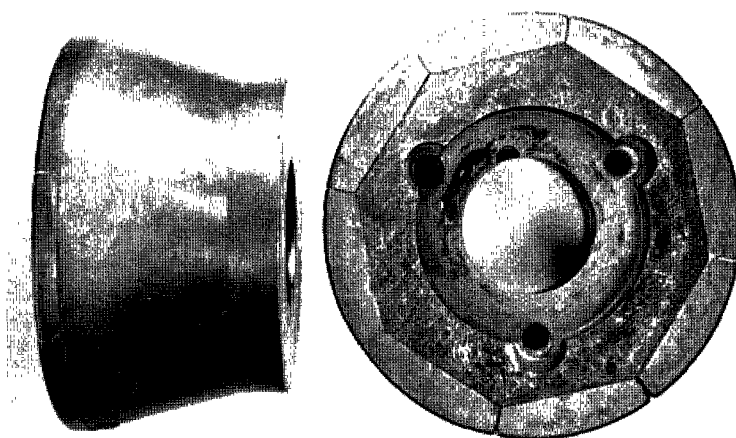


Figure 18 : Molette coupante d'essai avec arête coupante carburée (150 mm de diamètre)

3. Résultats des recherches

3.1 Définitions

Il n'existe pas de nomenclature d'un usage général pour les trois composantes de l'effort de coupe, mesurées aux molettes coupantes. Il n'est pas opportun de choisir, pour ces efforts, des termes techniques qui font appel à un système de référence lié à l'installation expérimentale ou à la voie en creusement ; en effet, ces termes n'auraient pas la même valeur pour une tête de fraisage munie de molettes coupantes tournant concentriquement et pour une tête dont les porte-outils sont animés d'un mouvement de rotation planétaire. De même, il est impropre de choisir les désignations en fonction d'un système de référence rapporté à la molette coupante ; en effet, l'axe de la molette, rapporté à la surface de roche attaquée, peut prendre une inclinaison différente de celle suivie au cours de l'essai. C'est pourquoi, nous avons écarté les termes "axial", "radial" et "tangential" et opté pour les désignations explicitées à la Figure 19. Nous avons représenté les efforts à fournir au corps de la molette (= forces agissantes).

L'ensemble de l'effort s'exerçant sur chaque molette est dénommé effort de coupe F_s .

La composante de l'effort de coupe suivant la direction d'avancement de la molette coupante (perpendiculairement à la direction du déplacement de la molette) est définie comme l'effort de pénétration F_e .

L'effort à fournir à l'axe de la molette, en direction du déplacement de cette molette, en vue de vaincre la résistance au roulement présentée par les inégalités de la surface rocheuse, est dénommé effort de roulement F_r .

.../...

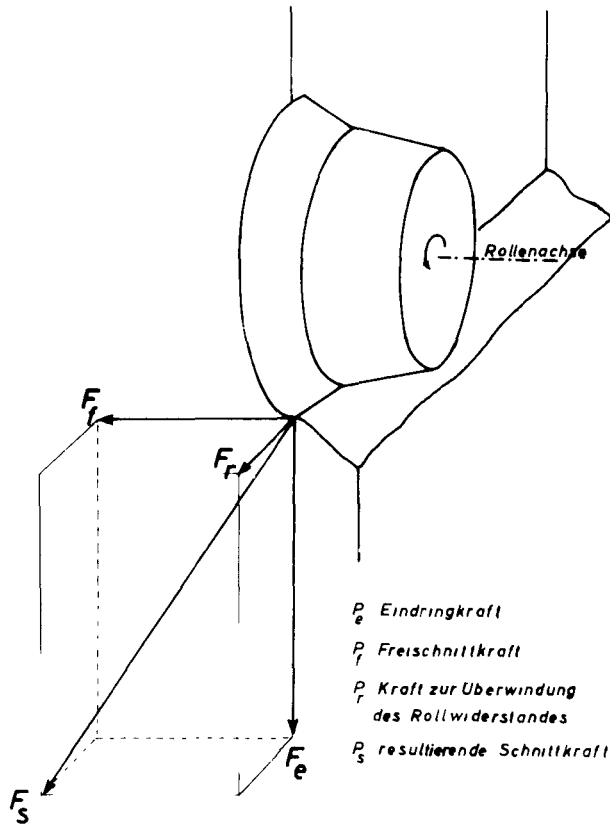


Figure 19

Les efforts qui s'exercent sur une molette coupante (forces agissantes)

Rollenachse = axe de la molette

La troisième composante de l'effort de coupe se situe perpendiculairement au plan formé par l'effort de pénétration et l'effort de roulement. Elle n'existe qu'au cas où l'on bénéficie de l'effet d'une surface libre, lors du fraisage avec la molette coupante. Dans le cas de la disposition usuelle, non étagée, des taillants à molettes, suivant des trajectoires de coupe concentriques, cette composante d'effort ne se manifeste pas. Par analogie avec la découpe par enlèvement de copeaux, à l'aide de taillants en métal dur, cette composante a été dénommée effort de dégagement interne F_f .

En plus des efforts, la profondeur de pénétration t constitue une notion essentielle. Dans le cas d'une tête de fraisage dont les molettes suivent des trajectoires concentriques, cette profondeur est égale à l'avancement obtenu lors d'une rotation de la tête de coupe, à condition qu'il n'y ait qu'une seule molette coupante par trajectoire de coupe. Si plusieurs molettes circulent sur la même trajectoire de coupe, l'avancement par révolution doit alors être divisé par le nombre de molettes, si l'on veut obtenir la profondeur de pénétration t qui se rapporte toujours à une seule molette coupante.

Outre la profondeur de pénétration, il existe encore deux autres grandeurs géométriques qui précisent la disposition des molettes coupantes ; elles sont nécessaires pour caractériser les conditions de fragmentation les plus importantes. Pour ces grandeurs géométriques également, tout comme pour les efforts, il n'est opportun de lier leur désignation, ni à un système de référence rapporté à la molette coupante, ni à un système rapporté à la voie en creusement.

La largeur d'enlevure b caractérise l'écartement latéral des trajectoires de coupe. Dans le cas d'un engin muni de molettes coupantes circulant concentriquement, cet écartement est mesuré suivant la direction radiale de la tête de fraisage ; s'il s'agit d'une machine dont les porte-outils sont animés d'un mouvement de rotation planétaire, on le mesure alors dans la direction de l'axe de la galerie.

La hauteur de redent s caractérise l'écartement des trajectoires de coupe, dans la direction de l'axe de la galerie, pour une tête de fraisage à molettes circulant concentriquement. Ce paramètre n'est pas défini dans le cas d'une tête dont les porte-outils sont animés d'un mouvement de rotation planétaire.

3.2 Dépouillement du rapport des mesures

La Figure 20 présente un extrait d'un rapport de mesures et donne, d'une manière précise, la variation dans le temps de l'effort de pénétration et de l'effort de dégagement interne. L'enregistrement des paramètres de mesure, effectué sur papier sensible, révèle les fortes variations de charges sur l'arête coupante et le palier du taillant à molettes, et permet d'avoir un bon aperçu du processus de fraisage. Si l'on compare la variation des efforts de deux cycles de travail successifs, à un endroit déterminé de la roche étudiée, on constate alors de quelle manière la surface de roche attaquée se modifie en permanence sous l'action des molettes coupantes. Sous l'influence

.../...

d'une crête d'effort élevée, d'importants copeaux de roche sont détachés. L'effort de coupe régresse alors brutalement. Suivant la grandeur du fragment de roche abattu, la molette coupante peut même travailler sans effort pendant un court laps

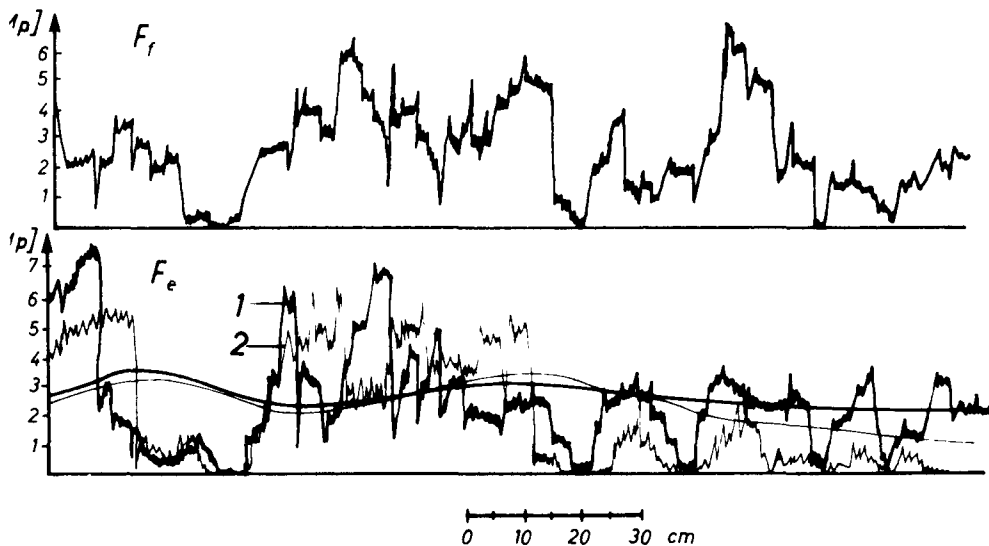


Figure 20 : Extrait d'un rapport de mesures (papier sensible)

Roche : Grès bigarré

Largeur d'enlevure : 40 mm, hauteur de redent : 70 mm

Profondeur de pénétration : 10 mm

1,2 : piste enregistrée sur la distance de mesure, lors du premier ou du second passage de la molette coupante

de temps. C'est pourquoi, les fortes variations d'effort caractérisent un processus de fraisage efficient ; elles se rencontrent donc spécialement aussi, en cas de fraisage avec une surface libre. Profondeur de pénétration, largeur d'enlevure et hauteur de redent déterminent la grandeur des copeaux de roche, caractéristiques du processus de découpe à étudier, et également, l'ampleur des fluctuations d'efforts, inhérentes au procédé. Dans le cas de l'effort de pénétration et de l'effort de dégagement interne, les pointes atteignent le triple de la valeur moyenne ; pour l'effort de roulement, ce rapport est encore considérablement plus élevé : on mesure des crêtes atteignant dix fois la valeur moyenne.

.../...

A côté des éclatements réguliers de roches, déterminés par les conditions d'essai, on observe cependant aussi des fragments isolés nettement plus importants qu'on peut attribuer aux points faibles de la roche : ce phénomène est rendu possible avant tout parce que le bloc de roche servant à l'essai a été isolé du massif sur toutes ses faces. De tels fragments que l'on ne rencontre pas en pratique sont à attribuer exclusivement aux particularités de l'installation expérimentale. Sur le diagramme d'enregistrement, ils peuvent être repérés, dans le tracé de l'effort d'une molette coupante, comme des lacunes plus importantes, dont l'ampleur excède ce qui est théoriquement attribuable à un copeau rocheux régulièrement abattu ; du reste, ces lacunes se représentent périodiquement, à plus long terme, à chaque révolution de la table pivotante. Lors du dépouillement des résultats d'essai, ces fragments qui ne sont pas inhérents au procédé, peuvent être éliminés. On dispose d'ailleurs de la possibilité d'ajuster différemment le degré d'amortissement pour l'enregistrement de la valeur moyenne.

Une comparaison des composantes de l'effort de coupe, enregistrées aux trois molettes coupantes, permet d'éliminer d'autres sources d'erreurs possibles, lors du dépouillement. C'est ainsi par exemple que l'on peut repérer, à un niveau d'effort étonnamment bas, la pré-fragmentation du noyau rocheux, créée par la découpe précédente. Mais, des efforts inhabituellement élevés, qui peuvent surtout se présenter en direction axiale des molettes, lors de la taille de la roche expérimentale, sont également perceptibles et peuvent être éliminés lors du dépouillement ultérieur.

L'influence des différentes conditions expérimentales sur l'effort de coupe à une molette isolée, trouve sa meilleure représentation dans la valeur moyenne des efforts. En outre, la valeur moyenne présente une très grande importance pour l'estimation à posteriori de la force totale agissant sur la tête de fraisage et la machine de creusement. Au cours de l'essai, on réalise des conditions de découpe (largeur d'enlevure, hauteur de redent, profondeur de pénétration) identiques à celles de

.../...

la pratique ; on tient compte, en outre, de l'influence mutuelle des trajectoires de coupe voisines. Dès lors, la forme de la surface rocheuse et la forme des fragments détachés ne se différencieront pas, en pratique, de celles observées au cours des essais. Il est donc justifié de supposer que l'évolution précise des efforts à chaque molette, en fonction du temps, et, finalement, la valeur moyenne de l'effort, sont les mêmes dans les deux cas. L'ensemble des efforts s'exerçant sur la tête de fraisage s'obtient donc en additionnant les valeurs moyennes des efforts s'exerçant sur chaque molette individuelle. Plus une tête de fraisage comptera de molettes et plus on enregistrera d'uniformité dans l'allure de l'effort total.

Bien que, lors du calcul des valeurs moyennes, on ait éliminé les influences sans rapport avec le procédé, et qu'en outre, on n'ait retenu que les plus longs parcours d'une molette coupante (au moins, une révolution de la table pivotante), les valeurs moyennes présentent encore des écarts considérables. C'est pourquoi on ne peut relever aucune relation exacte entre les paramètres et les conditions d'essai, mais uniquement des zones dans lesquelles ces relations fluctuent. Pour cette raison, il nous a paru opportun de choisir, pour expliquer les résultats des mesures, un type de présentation qui permet de fournir des indications quantitatives sur l'ampleur des variations et sur la fiabilité d'une relation établie à partir des valeurs fluctuantes relevées. A ce sujet, on dispose de l'outil de la statistique mathématique (6,7).

Si l'on a déjà, lors du dépouillement des rapports d'enregistrements de mesures, éliminé toutes les erreurs systématiques perceptibles, les fluctuations subsistantes des valeurs mesurées ne peuvent plus être attribuées qu'à des variations de résistance de la roche, des erreurs de lecture, des erreurs de réglage, ou, éventuellement, au comportement mécanique de l'appareillage expérimental, imprécis dans sa fixation. Ces causes d'erreurs dont on ne peut séparer l'influence sur les mesures, s'exercent

dans leur ensemble, comme des écarts de mesures purement accidentels. Dans ces conditions, l'hypothèse d'une répartition des mesures variables suivant une loi de Gauss (valeurs moyennes) est justifiée et c'est, en outre, la plus judicieuse.

Les valeurs mesurées se prêtent donc à un calcul de compensation (désigné souvent aussi comme une analyse de régression). A condition que la somme des carrés des erreurs constitue un minimum, les valeurs mesurées permettent d'établir une courbe "optimale", déterminée avec précision, appelée courbe de compensation (courbe de régression), dans l'hypothèse, toutefois, que la formule mathématique générale de la courbe de compensation soit déterminée avant le calcul. Admettre une dépendance linéaire entre les grandeurs mesurées et la condition expérimentale étudiée constitue l'hypothèse la plus simple, eu égard à l'ampleur du calcul ; c'est aussi toujours la plus judicieuse s'il n'existe aucun autre repère à propos du tracé probable de la courbe, par exemple, du fait de conditions aux limites connues. L'effort de pénétration, avant tout, et l'effort de dégagement interne, mais dans une mesure moindre, suivent fréquemment, par contre, de prime abord, une allure nettement parabolique en fonction de la profondeur de pénétration. C'est pourquoi, on a prévu pour toutes les valeurs mesurées, outre la compensation normale linéaire, une autre compensation linéaire dans un système de coordonnées doublement logarithmique ; dans ce système les courbes paraboliques apparaissent comme des droites. Outre les coefficients relatifs à la fonction de la courbe de compensation, le calcul de compensation fournit aussi les erreurs moyennes et la dispersion de ces coefficients.

Les techniques de la statistique moderne donnent, en outre, le moyen d'apprécier la "qualité" d'une régression mise en pratique (calcul de compensation). A l'aide de valeurs dites $t_{s,f}$ présentées sous forme de tableaux (6), on peut calculer des limites de confiance pour les coefficients de régression obtenus ainsi que pour chaque point particulier de la courbe de régression ;

.../...

ces limites sont fonction de ce que l'on convient d'appeler le degré de liberté f (et donc, du nombre de mesures données) ainsi que de la sécurité S , souhaitée pour les renseignements à calculer. La zone de confiance bornée par la limite supérieure et par la limite inférieure de confiance, indique qu'en cas de répétition de l'essai, le paramètre mesuré avec la sécurité choisie S , se trouverait dans la zone de confiance. En outre, l'indication des limites de confiance fournit des possibilités de test. On peut contrôler si les coefficients de régression obtenus, compte tenu de la sécurité choisie pour leur zone de confiance, sont compatibles avec toute valeur prédéterminée.

Tous les calculs nécessaires à la compensation des résultats des mesures ainsi qu'à la représentation de la zone de confiance, ont été effectués sur la calculatrice électronique ZUSE Z 23, de l'Université Technique de Clausthal. Pour la représentation graphique des courbes de compensation et de leur zone de confiance, on a utilisé la table à dessin, à programmation automatique ZUSE Graphomat Z 64.

3.3 La vitesse de découpe

Avec les engins usuels de creusement de voies dont les outils de coupe effectuent des trajectoires concentriques, la vitesse de coupe varie, en fonction du diamètre de la trajectoire de coupe, entre une valeur à peu près nulle au centre de la voie et une valeur maximale atteinte à la périphérie de cette voie. Avec presque toutes les machines de coupe à molettes, taillant jusqu'à 3 mètres de diamètre et également avec la plupart des plus gros engins, on ne dépasse pas une vitesse de coupe d'environ 90 m/min. (1,5 m/s). En fonction du diamètre de la voie creusée, la vitesse de rotation de la tête de fraisage est adaptée à cette vitesse de découpe. Cette limite supérieure de la vitesse de découpe qui a été fixée par des voies purement

.../...

empiriques, ne peut plus être sensiblement dépassée pour de nombreuses raisons. L'évacuation des déblais au front de traçage et leur reprise par la benne élévatrice, l'échauffement et la sollicitation dynamique des arêtes de coupe et des paliers des taillants à molettes, de même que le dégagement de poussières sont autant de raisons qui militent en faveur d'une vitesse de découpe aussi réduite que possible.

Au cours de l'essai, on a étudié, jusqu'à 1 m/s, l'influence de la vitesse de découpe sur les efforts à l'outil de creusement et sur l'opération de fraisage. L'annexe 2 rassemble les résultats de cette série d'essais. Il appert que les efforts mesurés pour des vitesses de découpe différentes se situent à l'intérieur de la zone d'erreur des mesures de comparaison, pour une vitesse de découpe constante (Annexe 2.1). Les résultats des mesures ne révèlent, à l'intérieur de la zone étudiée, aucune influence de la vitesse de découpe sur les efforts. Des vitesses de découpe plus élevées, dépassant le mètre par seconde, n'ont pu être réalisées avec l'entraînement hydraulique actuel. Sur la base des recherches effectuées, on peut cependant conclure que même pour des vitesses de coupe de l'ordre de 1,5 m/s, l'influence sur l'effort de coupe - si tant est qu'elle existe - sera négligeable parce que faible.

Cet important résultat expérimental concorde avec des publications d'autres études que l'on retrouve dans la bibliographie. Des publications de résultats de recherches concernant le fraisage avec molettes coupantes apparaissent dans des périodiques russes (1,3). Ces travaux se rapportent, il est vrai, à des molettes coupantes qui sont disposées de la manière usuelle d'aujourd'hui, c'est-à-dire non étagées, sur une tête de fraisage plane. Mais il n'existe aucune raison essentielle incitant à croire que le rapport entre la vitesse de découpe et les efforts devrait prendre, dans le cas des molettes coupantes à disposition étagée, une valeur sensiblement différente de celle obtenue dans le cas des molettes disposées dans le même plan. BARON, ZAGORSKIJ et LOGUNCOV ont, de même, exploré la gamme des vitesses de coupe jusqu'à 1 m/s, dans le cas du fraisage du grès par molettes

coupantes et ils ont constaté que ces vitesses n'influencent pas les efforts de coupe. DERKAC, ANGELOV et KAPRIVIN communiquent que "même dans des intervalles plus importants" ils n'ont relevé aucune influence de la vitesse de découpe sur les efforts. En vertu de la similitude du processus de fragmentation des roches, il est intéressant de faire une comparaison avec le cas de la découpe par outil carburé. BELUGOU et VALANTIN (2) ont exploré les vitesses de découpe entre 0 et 7 m/s et ont constaté qu'efforts et vitesses de découpe sont indépendants.

3.4 La courbure de la trajectoire de coupe

Sur une tête de fraisage à trajectoires concentriques des outils, la courbure de la trajectoire de coupe est inversement proportionnelle à la vitesse de découpe. Elle diminue depuis le centre de la voie jusqu'à sa périphérie. Dans le cas d'une tête de fraisage dont les porte-outils sont animés d'un mouvement de rotation planétaire, il n'existe en fait aucune courbure de trajectoire correspondante. Les molettes coupantes travaillent dans ce cas, parallèlement à une paroi pratiquement plane.

Tout comme pour la vitesse de coupe, on n'a pu démontrer aucune influence de la courbure de trajectoire de coupe sur les efforts. L'annexe 3 donne un exemple de fraisage expérimental dans le grès de la Ruhr ; on confronte les efforts à une molette coupante dans le cas de deux diamètres de trajectoires de coupe : 400 et 700 mm. Les droites de compensation des valeurs mesurées se recouvrent pratiquement à l'intérieur de leur zone d'erreur. Une influence de la courbure de trajectoire de coupe n'est pas perceptible.

Ce résultat expérimental recoupe également les indications relevées dans la bibliographie russe déjà mentionnée. DERKAC, ANGELOV et KAPRIVIN ont étudié le diamètre de trajectoire de coupe entre 400 et 2150 mm ; ils ont découvert que l'effort de pénétration n'y varie pas et que l'effort de roulement croît d'environ 10 %, uniquement dans la zone des diamètres les plus faibles, ce

qui revient à dire qu'il est pratiquement constant, lui aussi. BARON, ZAGORSKIJ et LOGUNCOV ont étudié le diamètre de trajectoire de coupe, uniquement entre 200 et 800 mm. Dans le cas des faibles diamètres de molettes (96 mm), ils n'ont constaté aucune influence de la courbure de trajectoire sur l'effort de coupe. Ce n'est que dans le cas des molettes de plus grandes dimensions et de très petits diamètres de trajectoire qu'ils ont enregistré une modification certaine de l'effort de coupe ; celle-ci, toutefois, peut être attribuée uniquement à un contact de la molette coupante avec les parois de la rainure qu'elle découpe.

3.5 Choix de la forme des molettes coupantes

Dans le cadre de ce projet de recherche, nous n'avons fait qu'effleurer le problème de la forme de l'outil de coupe. Comme nous le montrons par après, de nombreuses raisons, dont certaines sont étayées par des résultats expérimentaux, plaident pour un report de ce problème en faveur de recherches plus importantes.

Sur la base de considérations relatives à la technique de fragmentation, nous avons choisi le type de molette avec une seule arête coupante, en forme d'anneau fermé. Avec cet outil excessivement simple, seules les grandeurs géométriques suivantes peuvent encore avoir une influence sur le processus de désagré-gation de la roche et sur les efforts de coupe : 1) Diamètre de la molette coupante, 2) Angle de taillant et 3) Etat (forme) de l'arête de coupe.

Le diamètre de la molette coupante n'a plus qu'une importance secondaire, pour le processus de rupture de la roche à l'endroit de l'arête de coupe. Un diamètre plus important ne peut avoir qu'une influence, à savoir que l'effort de pénétra-tion et l'effort de dégagement interne à fournir à l'axe de la molette, augmentent à cause de l'accroissement de la surface d'appui et de la diminution de la pression superficielle de la roche, et que par contre, l'effort de roulement diminue en raison d'une réduction de la résistance au roulement d'une molette de dimensions plus importantes. L'observation précise du processus de fraisage montre, à chaque cas, qu'il n'y a qu'une

très petite partie de l'arête coupante en contact avec la roche ; on peut en conclure que les effets du diamètre sur les efforts et spécialement sur l'effort de pénétration, sont très minimes. Cette prévision est confirmée par les études de DERKAC, ANGELOV et KAPRIVIN. Un accroissement graduel du diamètre de la molette, de 240 à 300 mm, n'a, somme toute, pratiquement pas modifié l'effort de pénétration et n'a diminué l'effort de roulement, dans l'ensemble, que de 10 à 15 %. Vis-à-vis de considérations pratiques importantes, les influences minimales du diamètre de la molette, liées à la technique de fragmentation, passent complètement à l'arrière-plan. Vers le bas, le diamètre est limité : il est en effet indispensable de disposer dans le corps de la molette d'un système de support suffisamment robuste. Quelle résistance (et quelles dimensions) devraient avoir les paliers ? A ce sujet, les mesures d'effort de coupe exécutées fournissent au constructeur de précieux enseignements. Vers le haut aussi, le diamètre de la molette a une limite d'origine constructive : il faut pouvoir loger dans la tête de fraisage le nombre de molettes coupantes nécessaires à une attaque efficace et intéressante du front de traçage. Entre ces exigences, il ne reste qu'une faible marge pour le choix du diamètre de la molette.

L'angle du taillant et l'emplacement de l'axe de la molette déterminent l'angle de dégagement et l'angle de dépouille, si l'on transpose judicieusement aux molettes coupantes la terminologie du fraisage par enlèvement de copeaux. De nombreuses études relatives au fraisage par enlèvement de copeaux nous apprennent qu'en roches dures, cassantes (c'est-à-dire, non ductiles), l'angle de dégagement, aussi longtemps qu'il n'est pas fortement négatif, est pratiquement sans importance pour les efforts de coupe. L'angle de dépouille ne peut exercer une influence que si un dégagement interne n'est plus garanti. Avec une molette coupante, on ne peut s'attendre à une influence perceptible de l'angle de taillant sur les efforts, qu'au moment où n'est plus assuré le processus de fraisage efficace dans lequel la molette abat constamment des copeaux de roches plus importants, et où la molette découpe une rainure qui va en

s'approfondissant et aux parois de laquelle les flancs de son taillant viennent en contact. Comme ce processus indésirable de fraisage ne peut toujours bien s'éliminer en pratique, un angle de taillant le plus faible possible est favorable. Jusqu'à quel point peut-on diminuer l'angle de taillant ? Il s'agit uniquement d'un problème de qualités de résistance du matériau constitutif du taillant.

Parmi les facteurs déterminant la forme des molettes, l'arrondissement de l'arête coupante pourrait uniquement influencer, dans une plus forte mesure, sur les efforts. Cependant, tolérer un plus important rayon de courbure de l'arête coupante, revient à travailler avec une molette émoussée. Quelle doit être la valeur minimale du rayon de courbure à réaliser ? Il s'agit de nouveau d'un problème de propriétés si importantes de résistance du matériau de coupe. Avec un rayon de courbure de 3 mm pour la molette coupante en acier, ou, avec une plage aiguisée de 2 mm à la molette en métal dur, nous avons trouvé, après des recherches approfondies, des arêtes de coupe suffisamment résistantes pour pouvoir exécuter le programme de recherche prévu. D'autres études relatives à l'arrondissement de l'arête coupante ne rentrent pas dans le cadre de ce projet de recherche.

On a utilisé divers diamètres et divers angles de taillant dans les molettes expérimentales (Figures 17 et 18). Au cours des essais, on n'a cependant pu établir aucune différence entre les molettes coupantes en acier et les molettes en métal dur. L'exemple du grès bigarré, à l'annexe 4, montre, pour les deux types de molettes, de quelle manière les efforts de coupe fluctuent, dans la même zone, à toutes les profondeurs de pénétration.

Les réflexions mentionnées, corroborées par l'expérience, montrent que dans le cas des recherches de conformation de la molette coupante et de son arête de coupe, ce n'étaient pas tellement les influences liées à la technique de fragmentation mais plutôt les problèmes de résistance qu'il fallait mettre en relief. C'est pourquoi, la conformation de l'arête coupante doit

être envisagée aussi en étroite connexion avec le choix du matériau. Qu'il reste encore beaucoup à faire dans ce domaine, nos expériences de fraisage en granit le démontrent.

Mais, dans le cadre de ce projet de recherche, on a déjà accompli le premier pas sur la voie de la réalisation d'outils de coupe d'une meilleure résistance ; en effet, les mesures d'effort de coupe présentées ci-après montrent quels efforts devraient être repris à chaque molette pour parvenir à un bon résultat de fraisage.

3.6 La disposition des molettes coupantes

Au cours des recherches, on a distingué quatre dispositions différentes des molettes coupantes : chaque disposition concrétise une attaque de la roche bien déterminée (cfr. Figure 21) :

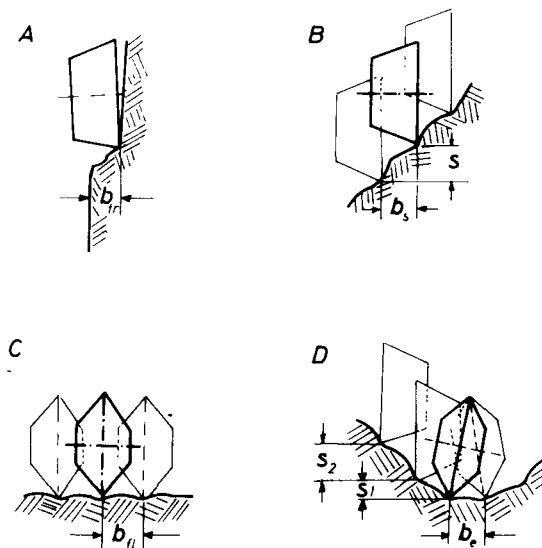


Figure 21 : Les modes d'attaque de la roche qui ont fait l'objet d'études

A. Le fraisage en présence d'une surface libre

Avec ce type d'attaque de la roche qui trouve son application technique dans un engin dont les porte-outils sont animés d'un mouvement de rotation planétaire, on tire

.../...

pleinement parti de l'effet d'une surface libre illimitée. De cette façon, l'effet de cisaillement souhaité est valorisé au mieux. Le paramètre caractéristique le plus important à étudier, dans ce processus de fraisage, est la largeur d'enlevure b_{fr} .

B. Le fraisage avec molettes coupantes disposées de façon étagée

Ces études s'appliquent au type de machine dont les molettes coupantes effectuent des rotations concentriques. L'attaque de la roche est caractérisée par la largeur d'enlevure b_s et la hauteur de redent s . Suivant l'ampleur de l'échelonnement, on tire plus ou moins parti de l'effet d'une surface libre et ainsi l'effort de coupe influe plus ou moins sur la molette coupante. La détermination de cette relation constitue le plus important sujet d'analyse de cette série d'essais.

C. Le fraisage avec molettes disposées dans le même plan

Avec cette disposition, toutes les molettes travaillent dans un seul plan, sur des trajectoires concentriques, comme c'est le cas normalement sur les machines actuelles à taillants à molettes. L'écartement de trajectoire b_{f1} qui correspond à la largeur d'enlevure constituée, dans cette disposition, le paramètre d'analyse le plus important.

D. La confection d'une entaille

Cette disposition particulière sert à étudier la réalisation d'une entaille annulaire pour la tête de coupe profilée en W. Les paramètres d'étude les plus importants sont : la largeur b_e de l'entaille ainsi que, surtout, le raccordement à la disposition étagée des molettes, caractérisé par la hauteur s_1 du redent formé par la trajectoire la plus voisine.

.../...

3.61 Le fraisage en présence d'une surface libre

Cette attaque de la roche est réalisée en faisant circuler les trois taillants à molettes expérimentaux, au même niveau, sur la même trajectoire. Contrairement au travail avec une molette unique, une telle disposition expérimentale garantit une bonne possibilité de contrôle des efforts mesurés et permet une meilleure maîtrise des efforts agissant sur l'installation d'essai.

L'annexe 5 reproduit tous les résultats de mesure de cette série d'essais. Les relations entre les diverses composantes de l'effort de coupe et la profondeur de pénétration présentent, dans tous les cas étudiés, quelques caractéristiques communes.

L'effort de pénétration est caractérisé par son accroissement, fortement dégressif, en fonction de la profondeur de pénétration. On peut élucider ce phénomène de la manière suivante : pour de faibles profondeurs de pénétration, la molette coupante ne peut cisailer aucun copeau important vers la surface libre. Elle tend plutôt à découper une rainure dans la roche, avec production de fines de fraisage. Si la profondeur de la rainure augmente, des fragments de roche plus importants se détachent sporadiquement vers la surface libre. Un tel processus de fraisage, rapporté au volume de produits de coupe abattus, exige des efforts de coupe comparativement élevés. Ce n'est seulement qu'au moment où l'effort de pénétration, assuré par le dispositif d'avancement, a atteint une certaine valeur minimale, fonction de la roche et de la largeur d'enlèvement, que de gros copeaux peuvent être cisailés vers la surface libre, suivant la forme typique représentée à la Figure 1. Ce processus, qui tout d'abord, ne se présente que sporadiquement, se multiplie avec une extraordinaire rapidité, en cas d'accroissement ultérieur de l'effort de pénétration. On enregistre donc, avec un accroissement insignifiant de l'effort de pénétration, une forte augmentation de la profondeur de pénétration. C'est pourquoi on peut donc parler d'une valeur-seuil de l'effort de pénétration ; ce n'est qu'au

delà de cette valeur que l'on obtient le processus de fraisage efficace visé. La représentation des résultats de mesures à l'aide des droites de compensation permet au coefficient de régression a_2 (intersection des droites de compensation avec l'ordonnée) de fournir un bon repère à propos du niveau de la valeur-seuil affectant l'effort de pénétration. Dans la pratique, cet effort de poussée devrait toujours être dimensionné de manière à dépasser cette valeur.

L'évolution de l'effort de dégagement interne en fonction de la profondeur de pénétration ne présente pas, par contre, l'accroissement dégressif prononcé. Une confrontation des courbes de compensation linéaires et paraboliques montre que l'accroissement n'est que faiblement dégressif en fonction de la profondeur de pénétration ; la plupart du temps, il peut être représenté très fidèlement par une droite qui passe par l'origine. Pour de faibles profondeurs de pénétration, l'effort de dégagement interne est plus faible que l'effort de pénétration. Mais, au fur et à mesure que la profondeur de pénétration augmente, il devient vite plus important que l'effort de pénétration ; pour de grandes profondeurs de pénétration, il constitue la plus forte composante de l'effort de coupe. On peut expliquer de la manière suivante l'accroissement prononcé de l'effort de dégagement interne avec la profondeur de pénétration : au fur et à mesure que la profondeur de pénétration augmente, des copeaux rocheux plus importants sont cisailés toujours plus fréquemment vers la surface libre et, de ce fait, la molette coupante doit travailler, dans une mesure toujours plus forte, une surface de roche fortement inclinée du fait de la forme de rupture de ces copeaux (cfr. la surface de rupture A_p à la Figure 1) et ainsi, elle est repoussée de la roche par un effet de coin amplifié. L'effort de dégagement interne, en forte croissance, amène en présence de profondeurs d'entaille importantes, des efforts de coupe élevés dont la reprise à l'arête de coupe et au palier de la molette suscite d'importantes difficultés. L'effort de dégagement interne pose donc une limite à la réalisation technique de profondeurs de coupe les plus élevées possibles, profondeurs souhaitables en raison de l'allure de l'effort de pénétration.

L'effort de roulement est sensiblement plus faible que les deux autres composantes de l'effort de coupe ; il est d'un ordre de grandeur du dixième environ. Les installations nous indiquent que la relation entre l'effort de roulement et la profondeur de pénétration se caractérise par une très bonne linéarité : la droite passe d'ailleurs par l'origine. A propos de l'allure de cette courbe, on peut ajouter ce qui suit, qui confirme le caractère vraisemblable des considérations :

Lors du roulement sur la surface rocheuse attaquée, la molette coupante rencontre constamment des particules de roche en saillie ; celles-ci sont réduites en éclats et expulsées du fait de l'écrasement. La Figure 22 montre ce processus d'écrasement à son stade initial.

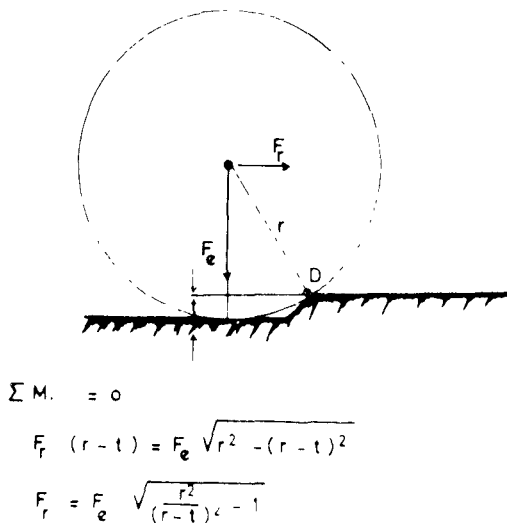


Figure 22

Relation entre l'effort de roulement, l'effort de pénétration et la profondeur de pénétration

On peut établir l'équation des couples, déterminée pour la rotation autour du centre instantané D. Lorsque le morceau de roche éclate sous la pression de la molette, il apparaît donc un effort de roulement F_r qui, en ampleur, est fonction de l'effort de pénétration F_e , de la profondeur de pénétration t et du diamètre de la molette. En vertu de la relation rapportée, il existe un rapport approximativement proportionnel entre l'effort de roulement F_r et la profondeur de pénétration t , si l'on prend, pour base de dépendance entre F_e et t , l'allure de courbe déjà discutée.

.../...

Les figures 23 - 25 illustrent l'influence de la largeur d'enlevure sur les composantes de l'effort de coupe. L'exemple du granit permet de confronter les courbes de compensation paraboliques des composantes de l'effort de coupe mesurées.

Il ressort clairement de la Figure 23 que l'effort de pénétration augmente progressivement avec la largeur d'enlevure. Cette relation est bien perceptible, dans le cas de toutes les roches. Les courbes indiquent qu'il existe une largeur d'enlevure optimale, pour laquelle le rapport entre l'effort de pénétration et la largeur d'enlevure atteint une valeur minimale ; ce rapport correspond à celui qui existe entre l'effort de poussée à appliquer en direction de l'avancement du fraisage, d'une part, et le volume des débris de fraisage, d'autre part. Les valeurs reprises à la Figure 23 permettent de déduire que ce rapport n'est influencé que dans une très faible mesure par la largeur d'enlevure, si celle-ci varie d'environ 2 à 3 centimètres. L'extrapolation des valeurs de mesure présentes permet de conclure qu'en roches dures, un accroissement de la largeur d'enlevure, au delà de 5 cm, agit défavorablement sur l'effort de pénétration.

L'effort de dégagement interne est beaucoup moins influencé par la largeur de coupe que l'effort de pénétration (Figure 24). Tandis que, dans le granit, un faible accroissement de l'effort de dégagement interne est encore perceptible en fonction de la largeur d'enlevure, le grès de la Ruhr et aussi le grès bigarré ne donnent pratiquement aucune relation. On peut expliquer ce phénomène de la manière suivante : pour cisailer des copeaux importants et donc pour créer, en connexion, des surfaces de rupture fortement inclinées, qui amènent l'effort de dégagement interne, un effort minimal de pénétration (ou une profondeur minimale de pénétration) est nécessaire, effort qui est d'autant plus élevé que la largeur d'enlevure est plus importante. Pour une profondeur de pénétration identique, mais avec des largeurs d'enlevure distinctes, le processus de fraisage est donc aussi qualitativement différent. Lorsque, par exemple, pour une

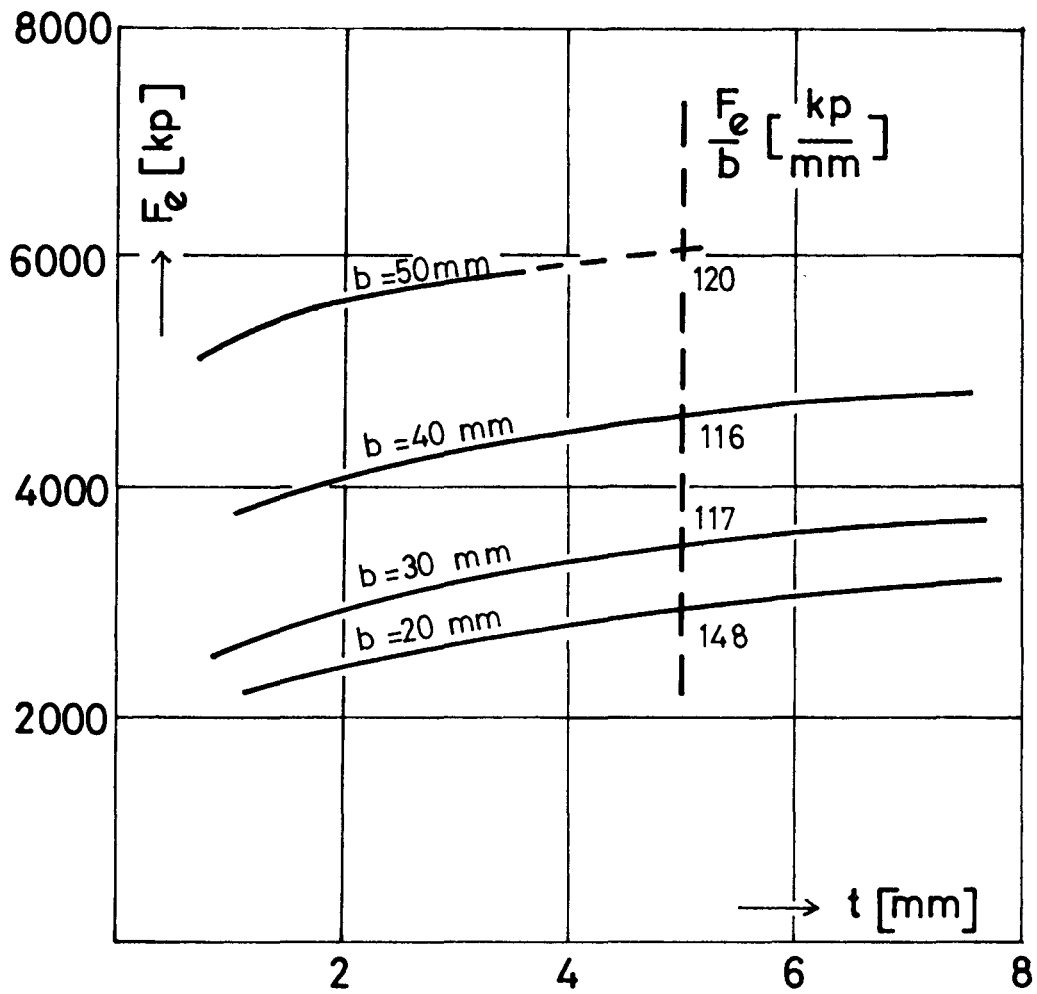


Figure 23 : Effort de pénétration pour différentes largeurs d'enlevure b , dans le cas du fraisage avec une surface libre

Roche : Granit

kp = kg

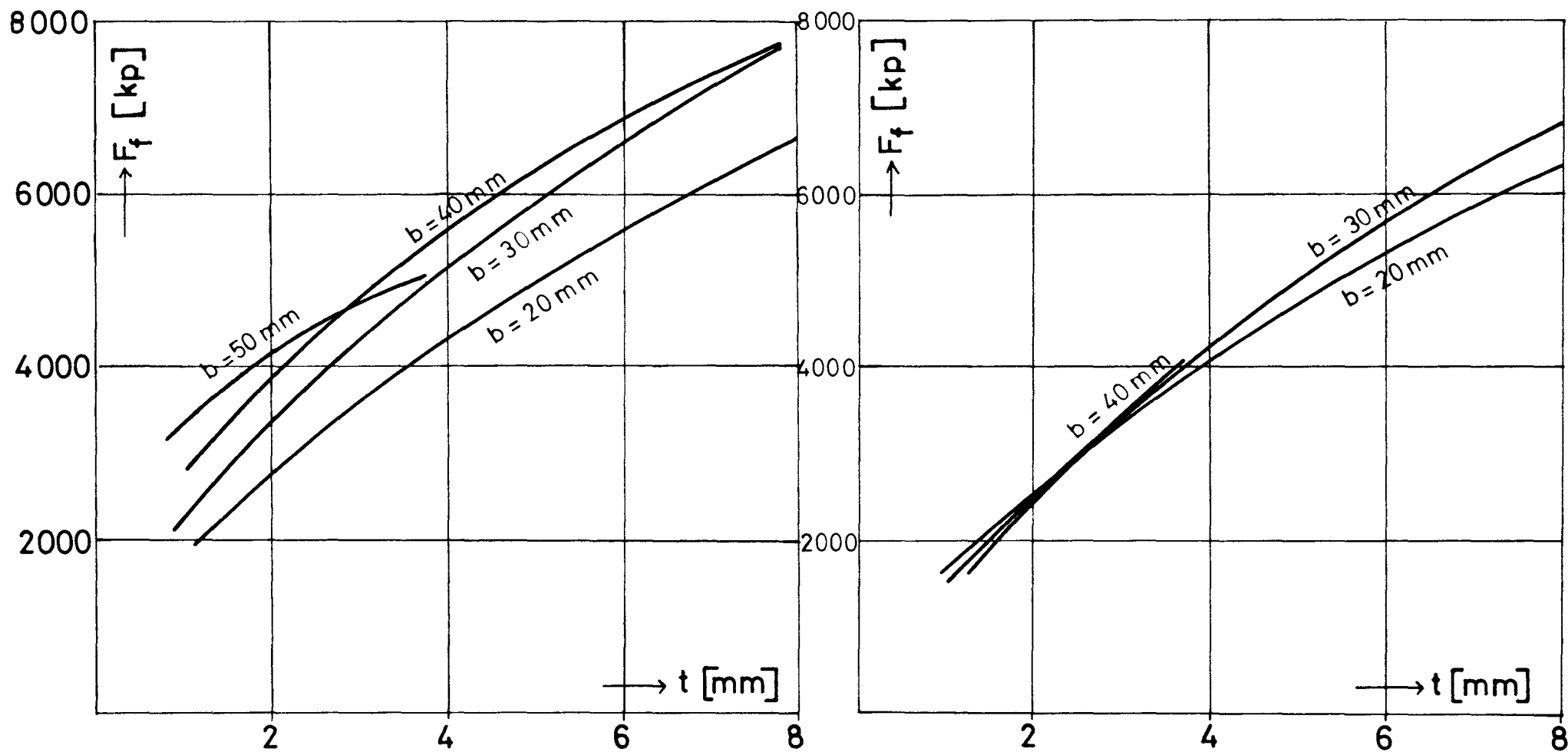


Figure 24 : Effort de dégagement interne pour différentes largeurs d'enlevure b , dans le cas du fraisage avec surface libre

à gauche : Granit

à droite : Grès de la Ruhr

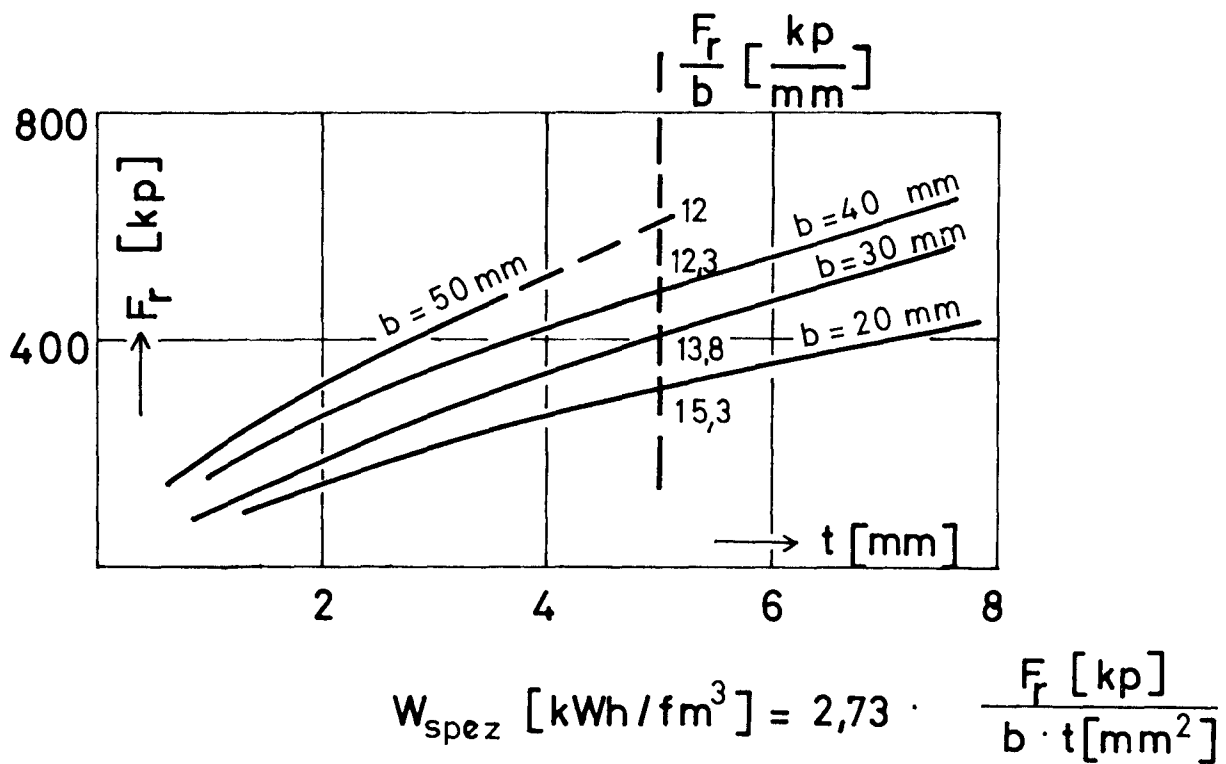


Figure 25 : Effort de roulement pour différentes largeurs d'enlèvement b , dans le cas du fraisage avec une surface libre

Roche : Granit

profondeur de pénétration de 10 mm, la largeur d'enlevure n'atteint que 20 mm, la molette coupante doit alors attaquer continuellement une surface rocheuse inclinée, causée par le cisaillement constant de copeaux de grandes dimensions ; dès lors, elle est exposée à de très importants efforts de dégagement interne. Si, au contraire, pour la même profondeur de pénétration, la largeur d'enlevure est nettement plus forte (par exemple 50 mm), on ne cisaille plus autant de gros copeaux vers la surface libre ; le coincement de la molette coupante sur la surface de rupture inclinée de la roche et l'effort de dégagement interne deviennent, dès lors, proportionnellement plus insignifiants. L'apparition plus rare de crêtes d'efforts de dégagement interne est cependant plus ou moins compensée par leur niveau, qui croît avec l'effort de pénétration lorsque les largeurs d'enlevure augmentent ; dès lors, les valeurs moyennes de l'effort de dégagement interne ne sont encore que faiblement influencées par la largeur d'enlevure. Cette réflexion permet de conclure que le rapport de l'effort de dégagement interne à l'effort de pénétration est également influencé, d'une manière décisive, par le rapport de la profondeur de pénétration à la largeur d'enlevure.

L'effort de roulement (Figure 25) présente, pour toutes les largeurs d'enlevure, une allure approximativement linéaire, en fonction de la profondeur de pénétration. On observe de nouveau l'étroite connexion entre effort de pénétration et effort de roulement. Tout comme l'effort de pénétration, l'effort de roulement augmente manifestement avec l'accroissement de la largeur d'enlevure. De ce fait, le rapport de l'effort de roulement F_r à la largeur d'enlevure b montre, tout comme le rapport de l'effort de pénétration à la largeur d'enlevure, qu'il existe une largeur d'enlevure optimale. Le travail à fournir pour la fragmentation de la roche sert presque uniquement à vaincre la résistance au roulement. C'est par conséquent le produit de l'effort de roulement et du trajet parcouru en direction de cet effort. Le volume de roches fragmenté, d'autre part, est le produit de la profondeur de pénétration, de la largeur d'enlevure et du trajet de roulement parcouru. Pour une même profondeur de pénétration, le rapport $\frac{F_r}{b}$ constitue donc une mesure de la consommation

.../...

spécifique d'énergie $W_{\text{spéc}}$. (La quantité de travail nécessaire à la fragmentation d'un volume unitaire). En comparant les Figure 23 et 25, on constate que la consommation spécifique d'énergie est affectée par la largeur d'enlèvement, de la même manière que le rapport $\frac{F_e}{b}$.

3.62 Molettes coupantes étagées

Pour réaliser ce type d'attaque de la roche, les trois molettes coupantes expérimentales ont été disposées, chaque fois, sur une trajectoire de coupe distincte. Entre ces trajectoires, on a réglé les largeurs d'enlèvement b et les hauteurs de redent s à étudier (Figure 26).

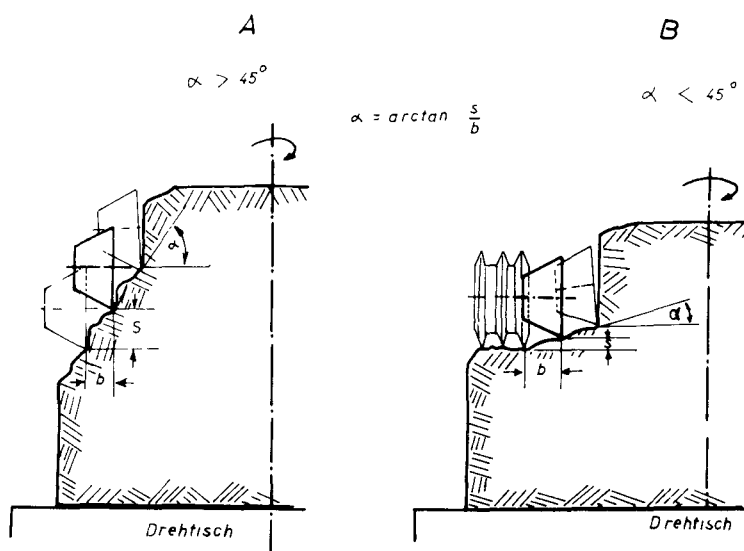


Figure 26 : Disposition expérimentale utilisée pour l'étude des molettes coupantes disposées en étagement
Drehtisch = Table pivotante

Le rapport s/b définit, en outre, la conicité d'une tête de fraisage hypothétique. Avec la disposition schématisée en A, la molette extérieure exploite l'effet avantageux d'une surface libre illimitée. La molette interne fraise, au contraire, dans des conditions plus pénibles, dans le noyau rocheux resté en place. Seule la molette centrale travaille tout comme une molette coupante disposée sur une tête de fraisage conique. Son travail de fragmentation est essentiellement influencé par les deux molettes circulant sur les trajectoires de coupe voisines ; elle seule peut

fournir des valeurs de mesure représentatives de la disposition étagée choisie dans chaque cas.

Si la hauteur de redent est trop faible (angle conique plus petit que 45° environ), en se référant à la disposition expérimentale de la Figure 26 A, le travail de fragmentation est transféré, dans une mesure plus ou moins forte, aux molettes internes, en fonction chaque fois de la profondeur de pénétration et de la largeur d'enlevure. Avec une très faible hauteur de redent, une petite largeur d'enlevure et une importante profondeur de pénétration, on peut même constater que seule la molette interne fraise encore, en cisillant vers la surface libre de très gros copeaux, avec une triple largeur d'enlevure b . Pour éviter cet inconvénient et conserver à la molette centrale une valeur de mesure représentative, même en cas de faibles hauteurs de redent, on a donné à la molette externe une forme annulaire et dentée en la munissant de plusieurs anneaux de coupe (voir Figure 26 B, cas des faibles étagements). Conformément à l'effet de frettage d'un tel taillant à molettes, effet déjà mentionné à la Figure 4, on évite alors, dans une large mesure, le dégagement de fragments de roche importants en direction de la surface libre.

Les résultats de l'étude des dispositions étagées des molettes coupantes sont repris à l'annexe 6. Tout comme dans le cas du fraisage avec une surface libre illimitée, on enregistre de nouveau l'allure déjà bien connue des composantes de l'effort de coupe, en fonction de la profondeur de pénétration ; l'effort de pénétration augmente clairement de façon dégressive, l'effort de dégagement interne ne croît que d'une manière faiblement dégressive et l'effort de roulement nettement plus faible est approximativement linéaire. Cependant, ce qui est important et caractéristique de la disposition étagée, c'est que l'on dispose actuellement, grâce à la modification de la hauteur du redent (ou de l'angle conique) d'un moyen d'agir, dans une mesure importante, sur la répartition de l'effort de pénétration et de l'effort de dégagement interne.

A la Figure 27, l'exemple du schiste quartzitique montre de quelle manière on se rapproche toujours davantage du fraisage avec une surface libre illimitée, au fur et à mesure qu'augmente la

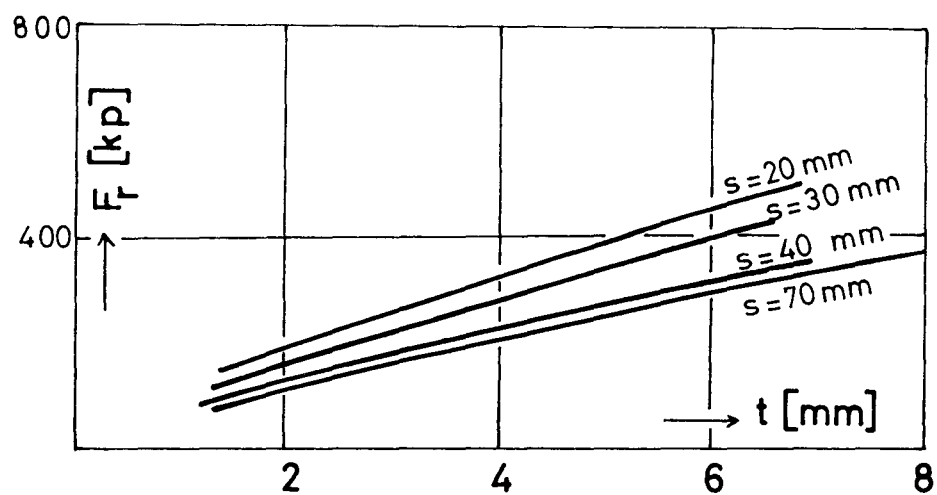
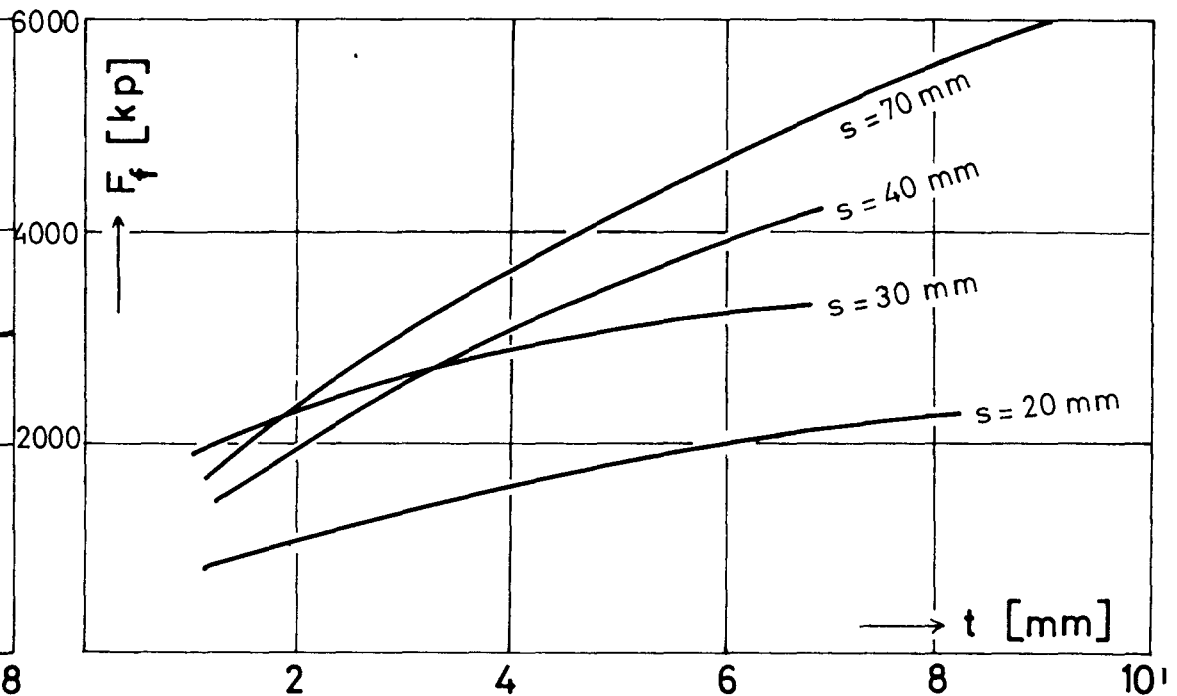
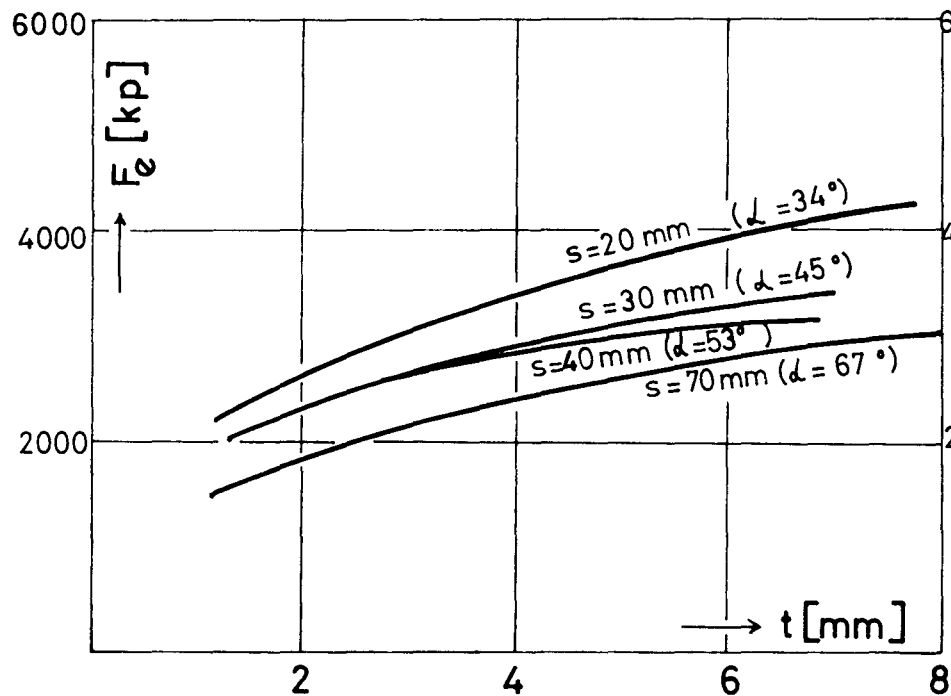


Figure 27

Effort de pénétration, effort de dégagement interne et effort de roulement pour différentes hauteurs de redent s (angle conique de 34° à 67°)

Roche : Schiste quartzitique

Largeur d'enlèvement : 30 mm

hauteur du redent. A partir d'un angle conique de 45° , l'effort de pénétration ne diminue plus, comparativement, que d'une façon insignifiante jusqu'à ce que soit pleinement utilisée la surface libre ; il atteint alors sa valeur minimale. Inversément, en cas d'accroissement de la hauteur de redent, l'effort de dégagement interne augmente et atteint sa valeur maximale, en utilisant pleinement l'effet d'une surface libre.

En prenant pour exemple le grès de la Ruhr, la Figure 28 montre les composantes de l'effort de coupe, lorsqu'on approche l'autre cas extrême, à savoir la disposition plane, non étagée, des molettes coupantes. Lorsque la hauteur du redent diminue, les efforts de pénétration s'accroissent fortement et atteignent leur valeur maximale en cas de disposition plane. L'effort de dégagement interne, au contraire, diminue fortement lorsqu'on se rapproche de la disposition plane des molettes et finalement, il disparaît complètement, lorsqu'on atteint ce type d'attaque de la roche.

Avec l'effort de dégagement interne, particulièrement, il est surprenant que l'effet d'un accroissement de la hauteur de redent se fasse sentir encore quelque peu au-delà de l'angle conique de 45° ($b : s = 1 : 1,5$) (cfr. Figure 27 ainsi que l'annexe 6.42), quoique la forme cisailée naturelle d'un copeau de roche montre un rapport largeur/hauteur de $1 : 1,5$, en cas de fraisage avec une surface libre (cfr. Figure 1). Ce phénomène peut s'expliquer de la manière suivante : sous l'influence de l'effort de dégagement interne, des fragments de roche se détachent aussi perpendiculairement à la direction d'avancement de la molette. Ce processus se manifeste toujours plus fréquemment au fur et à mesure que la hauteur de redent diminue ; mais il s'efface au contraire, lentement, lorsque la hauteur de redent augmente. Pour un rapport de la hauteur de redent à la largeur d'enlevure de $1,5 : 1$, on n'observe encore un tel processus de détachement de la roche que de façon sporadique. L'influence mutuelle des trajectoires de coupe voisines reste perceptible jusqu'à un rapport s/b de $2 : 1$ environ.

.../...

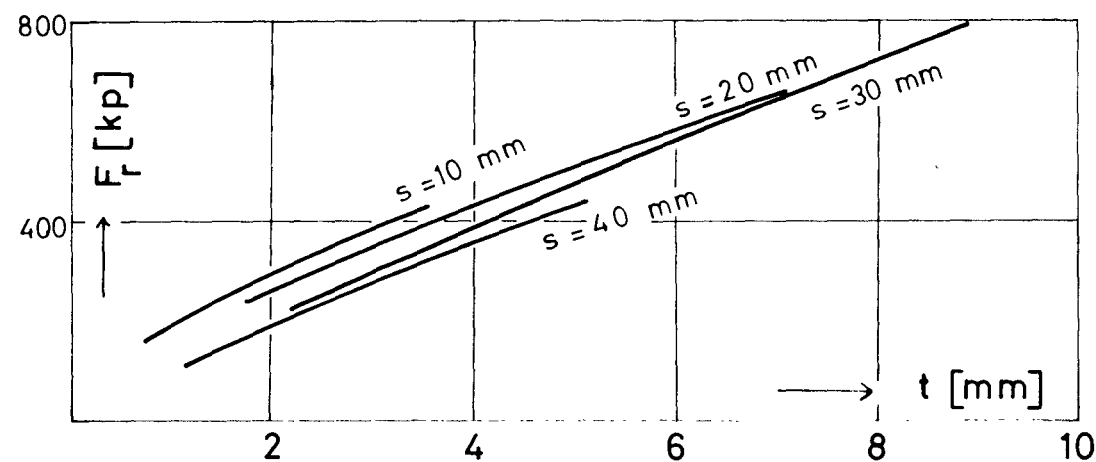
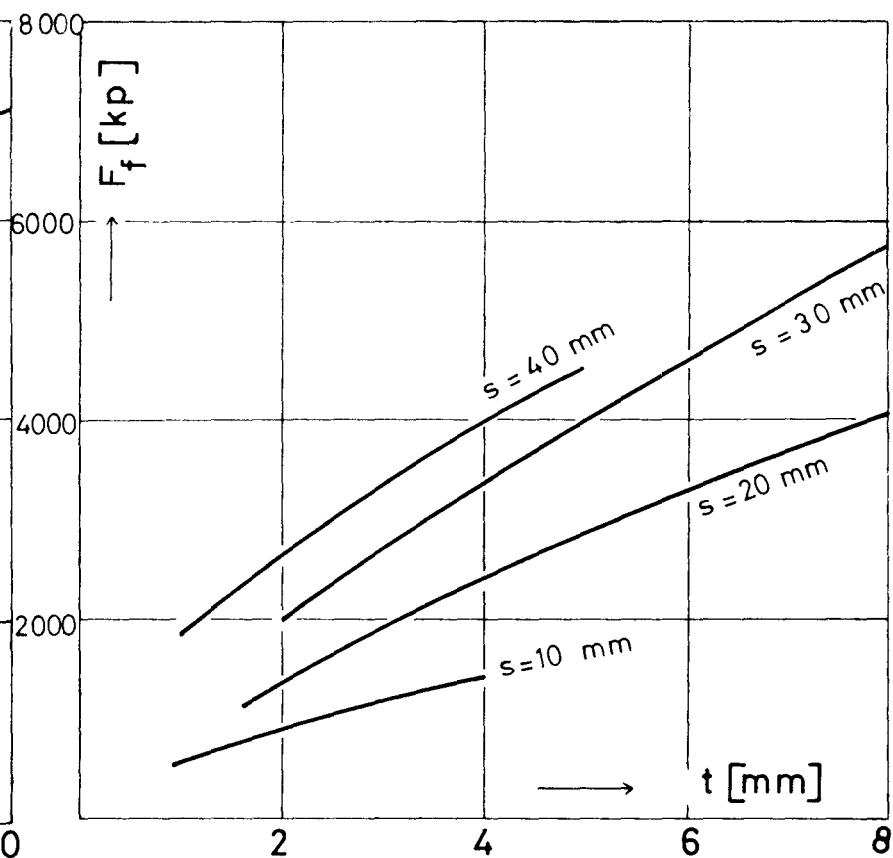
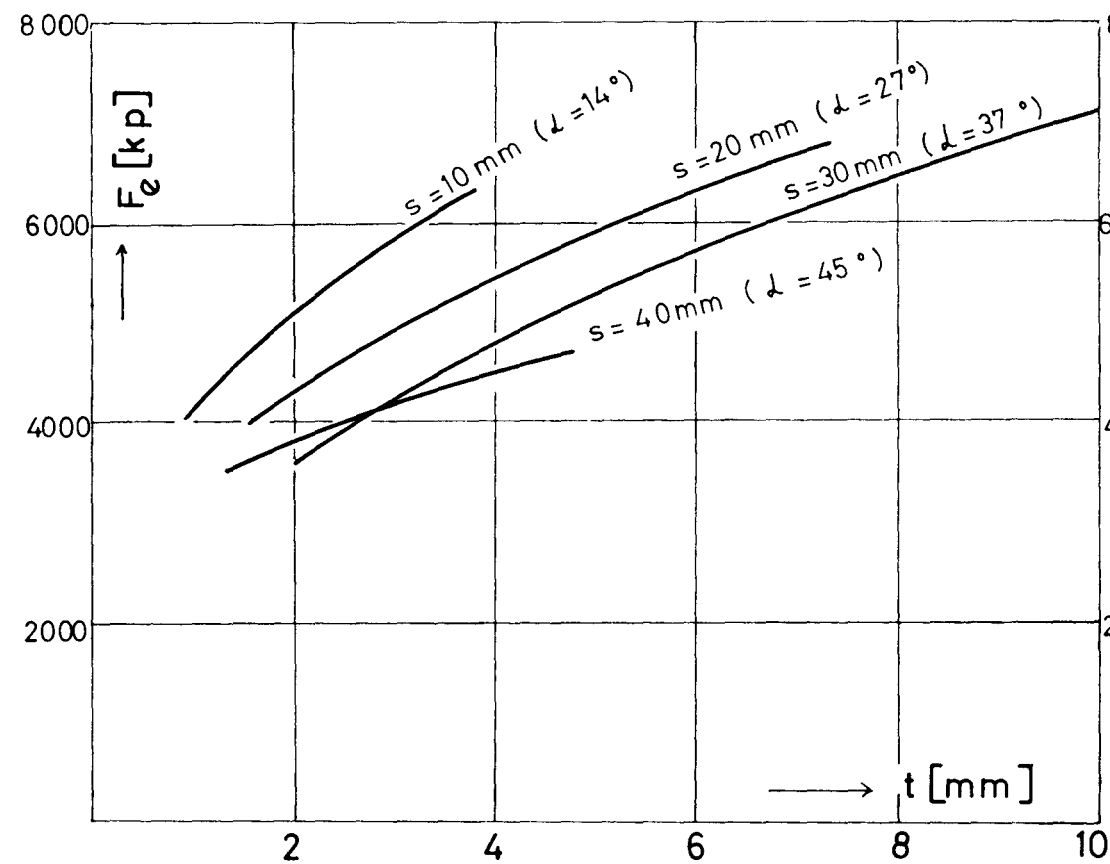


Figure 28

Effort de pénétration, effort de dégagement interne et effort de roulement pour différentes hauteurs de redent s (Angle conique de 14° à 45°)

Roche : Grès de la Ruhr

Largeur d'enlèvement : 40 mm

Les études montrent que la plus large utilisation possible de l'effet d'une surface libre entraîne, pour des hauteurs de redent importantes, de très grands efforts de dégagement interne. Dès lors, l'effort de coupe, qui résulte principalement de l'effort de pénétration et de l'effort de dégagement interne, prend aussi une valeur élevée. Ce fait est en contradiction avec la tendance à choisir, pour des raisons purement pratiques, un faible angle conique. Mais, d'un autre côté, il ne faut pas perdre de vue qu'en diminuant la hauteur du redent, on perd toujours davantage l'effet de cisaillement des molettes et que l'effort de pénétration augmente. Cet effort, pour de faibles hauteurs de redent, n'a plus son allure fortement dégressive, allure typique du fraisage où l'on utilise pleinement l'effet d'une surface libre.

3.63 Molettes coupantes disposées dans un même plan

La disposition expérimentale réalisée pour ces essais, est analogue à celle schématisée à la Figure 26 B. Cependant, par rapport aux essais de fraisage effectués avec des molettes coupantes faiblement étagées, la hauteur de redent de la molette médiane et de la molette interne est maintenant nulle. Une autre modification est apportée à la disposition expérimentale : la molette coupante médiane, qui fournit à nouveau les mesures représentatives d'efforts présente dans cette série d'essais une arête coupante symétrique par rapport à la direction d'avancement.

L'annexe 7 reprend les résultats des études d'essais de fraisage entrepris dans le schiste quartzitique et le grès de la Ruhr, avec la disposition plane des molettes coupantes.

Par opposition au fraisage avec une surface libre illimitée ou avec des molettes coupantes fortement étagées, on ne pouvait atteindre maintenant que des profondeurs de pénétration minimales (vitesses de fraisage). L'effort de pénétration prend des valeurs très considérables, lors du fraisage avec molettes disposées dans un même plan. Son allure en fonction de la profondeur de pénétration est nettement plus raide que dans le cas du fraisage avec

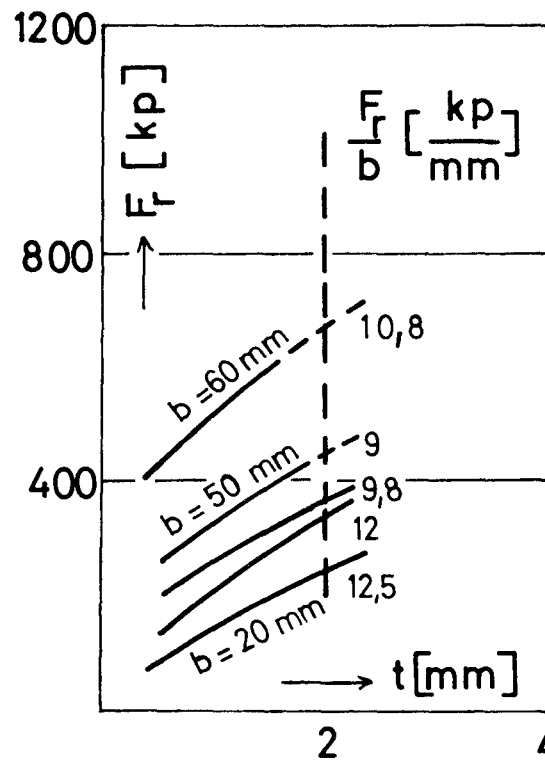
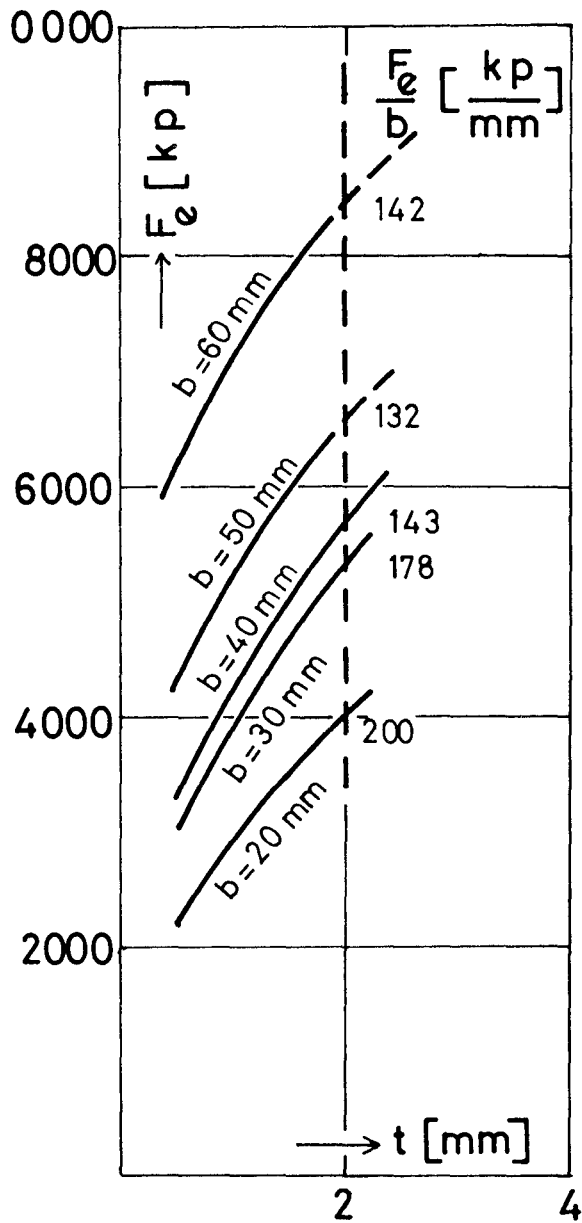
.../...

une surface libre. Une fois dépassée une valeur-seuil de l'effort de pénétration dans le cas du fraisage avec une surface libre, on devait s'attendre à une très forte progression de la profondeur de pénétration par le fait d'augmentations, même insignifiantes, de l'effort de poussée. Ceci n'est plus le cas lorsque le fraisage s'effectue avec des molettes coupantes disposées dans un même plan. On n'observe pas de valeur-seuil nettement marquée de l'effort de pénétration.

L'effort de roulement est de nouveau fonction de l'effort de pénétration. Conformément aux efforts de pénétration élevés, l'effort de roulement est - pour une même profondeur de pénétration - un peu plus élevé lors du fraisage avec disposition plane des molettes que lors du fraisage avec une surface libre.

La Figure 29 montre les efforts aux molettes coupante disposées dans un même plan, pour différents intervalles entre trajectoires de coupe (largeurs d'enlevure b). Le détachement de fragments de roche sous l'arête coupante se réalise maintenant symétriquement par rapport à la direction de l'avancement ; dès lors l'effort de dégagement interne est nul dans le cas de la disposition plane des molettes coupantes ; seuls l'effort de pénétration et l'effort de roulement peuvent encore être mesurés. Tout comme lors du fraisage avec une surface libre, on assiste aussi maintenant, de façon claire, à une augmentation progressive des efforts, à mesure de l'accroissement de l'intervalle entre trajectoires de coupe (largeur d'enlevure b). A nouveau, si pour une profondeur de pénétration constante, on rapporte les efforts à la largeur d'enlevure (et donc au volume de débris de fraisage abattus), on peut déterminer, dans le cas de la disposition plane des molettes tout comme dans le cas du fraisage avec une surface libre, une largeur d'enlevure optimale qui est du même ordre de grandeur. Par conséquent, dans le cas des molettes disposées dans un même plan, on ne devrait pas dépasser, en roches dures, une largeur d'enlevure de l'ordre de 5 cm.

.../...



$$W_{\text{spez}} [\text{kWh} / \text{fm}^3] = 2,73 \cdot \frac{F_r [\text{kp}]}{b \cdot t [\text{mm}^2]}$$

Figure 29 : Effort de pénétration et effort de roulement pour différentes largeurs de coupe b , dans le cas de la disposition plane des molettes coupantes

Roche : Schiste quartzitique

3.64 La confection d'une entaille

Par comparaison avec la disposition plane des molettes coupantes, la disposition expérimentale de cette série d'essais se distingue uniquement par le fait qu'actuellement la molette coupante interne est reculée d'une hauteur de redent variable s_1 .

L'annexe 8 rassemble les résultats de cette série d'essais. Il ressort de la Figure 30 que les conditions de travail de la molette antérieure, qui confectionne l'entaille, s'aggravent par le recul, d'une hauteur de redent s_1 , de la molette coisine. Si le recul de la molette voisine augmente, l'effort de coupe à la molette d'entaille augmente. Donc, lors de la confection de l'entaille, il faut fournir des efforts de pénétration encore plus élevés que dans le cas du fraisage avec molettes disposées dans le même plan. Un effort de dégagement interne se manifeste également ; cependant, vis-à-vis de l'effort de pénétration élevé, il est accessoire. L'effort de roulement, par analogie avec l'effort de pénétration, est un peu plus élevé que dans le cas d'une disposition plane des molettes.

Les études montrent que, dans le cas de la confection d'une entaille annulaire, on ne peut éviter de fournir des efforts de coupe élevés aux molettes, mais que cet accroissement se maintient encore complètement dans un cadre techniquement défendable, si l'on exécute ce passage à la disposition étagée des molettes via un étage intermédiaire. Si, par exemple, dans le cas d'une largeur d'enlevure unitaire de chaque molette de la tête de fraisage en W de 40 mm, on doit opérer avec une hauteur de redent de 40 mm également, il est alors opportun de choisir par exemple une hauteur de redent s_1 de 20 mm seulement, pour les molettes coupantes situées sur la première trajectoire de coupe à côté de l'entaille. L'effort de pénétration à fournir aux molettes d'entaille n'atteint alors qu'une valeur légèrement plus élevée (jusqu'à 20 % environ) que celle obtenue lorsqu'on opère avec les molettes disposées dans un même plan.

.../...

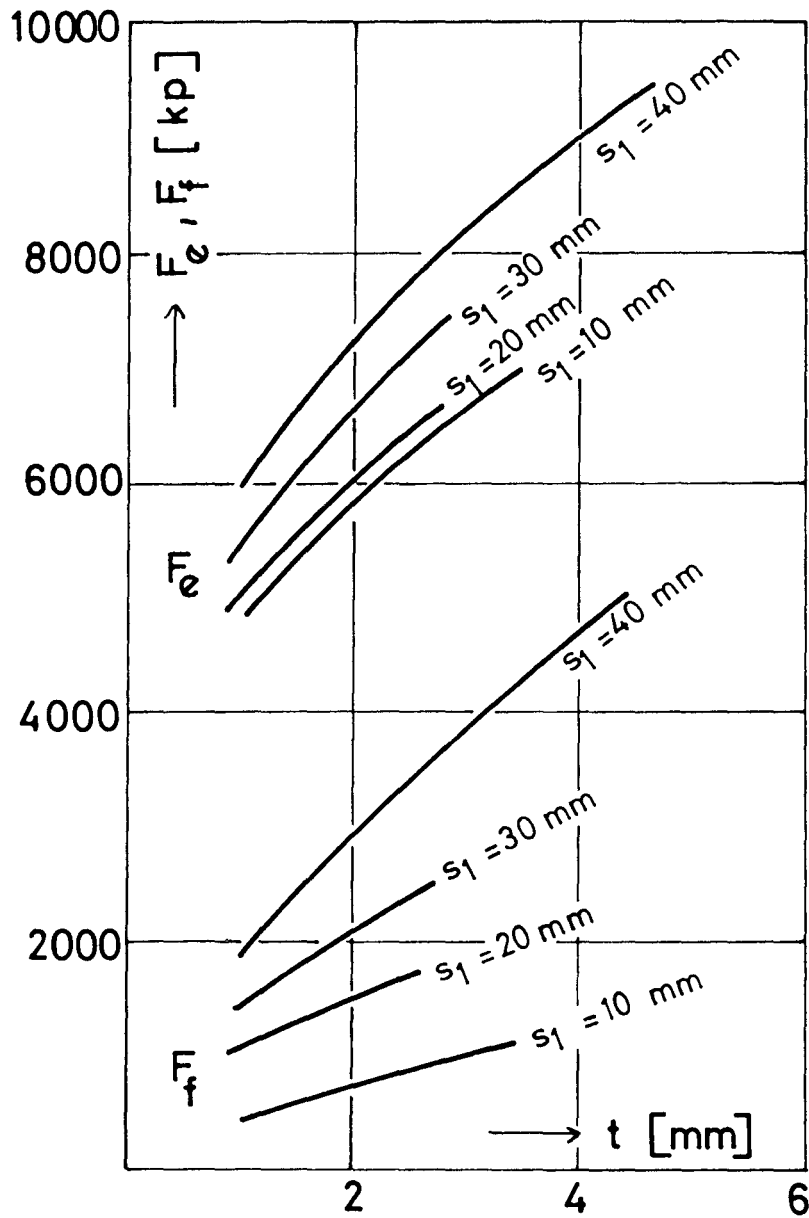


Figure 30 : Effort de pénétration et effort de dégagement interne, lors de la confection d'une entaille, avec différentes hauteurs de redent s_1
Roche : Grès de la Ruhr
Largeur d'enlevure : 40 mm

3.7. Résumé des résultats expérimentaux les plus importants

Bien que les valeurs individuelles mesurées subissent des variations élevées, inévitables et bien que le programme d'essais à réaliser ait été fréquemment restreint par le comportement à la rupture des blocs rocheux détachés du massif en place, il n'en reste pas moins que les relations les plus fondamentales, techniquement utilisables, sont nettement perceptibles.

En mesurant pour la première fois, dans trois directions spatiales, les efforts de coupe appliqués aux molettes, on est parvenu à saisir l'influence des diverses dispositions des molettes coupantes sur le processus de fraisage. Il appert que le nouveau procédé d'attaque de la roche, tirant parti d'une surface libre, offre des avantages considérables. Lors du fraisage au banc d'essai avec une surface libre, on a réalisé, en roches dures, des vitesses de fraisage très élevées qui actuellement dépassent de loin les valeurs atteintes, en traçages mécanisés, dans des roches comparables ; même en roches nettement plus tendres, ces valeurs ne sont atteintes que de temps à autre.

La Figure 31 montre les efforts de pénétration et les efforts de coupe à fournir, en fonction de la profondeur de pénétration, pour tous les types d'attaque étudiés, du procédé le plus favorable, à savoir le fraisage avec une surface libre, jusqu'au mode le plus désavantageux, à savoir la confection de l'entaille. L'économie importante réalisée sur l'effort de pénétration, dans le domaine représenté, augmentera encore fortement au fur et à mesure de l'accroissement des profondeurs de pénétration ; en effet, tous les résultats actuels de mesure permettent d'affirmer que l'effort de pénétration augmente encore fortement à mesure de l'accroissement de la profondeur de pénétration, pour les modes défavorables d'attaque de roches (disposition plane des molettes coupantes et confection de l'entaille) ; par contre, l'effort de pénétration montre, dans le cas du fraisage avec une surface libre, l'allure aplatie bien connue. Si on compare l'effort de coupe

.../...

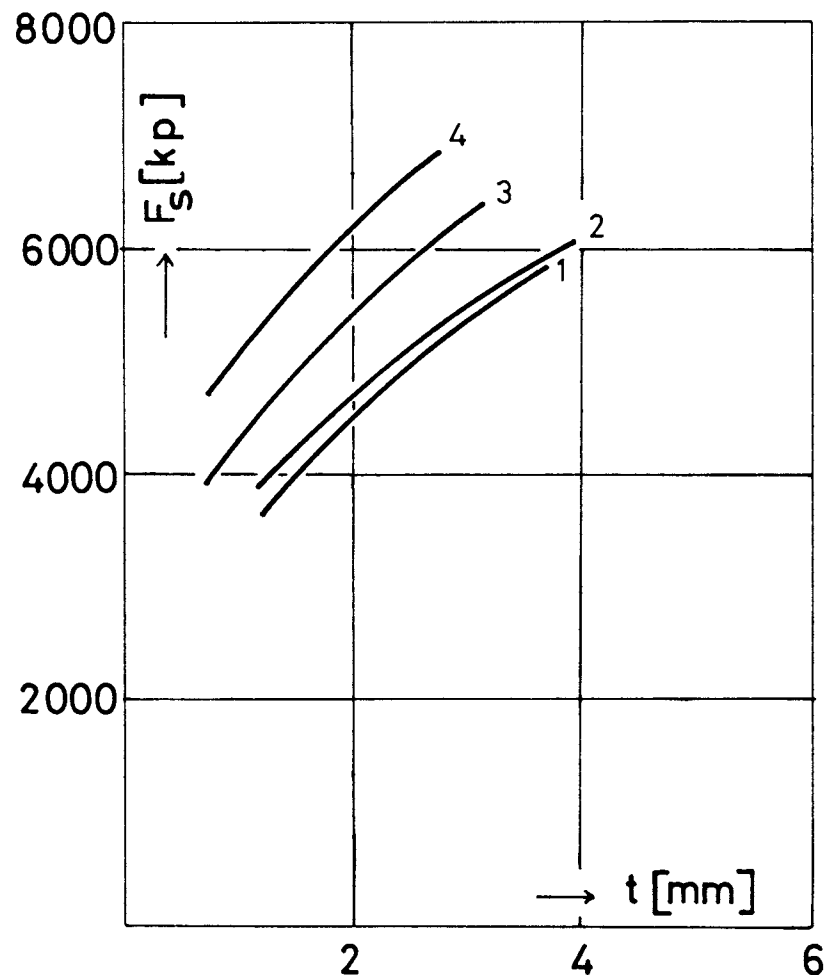
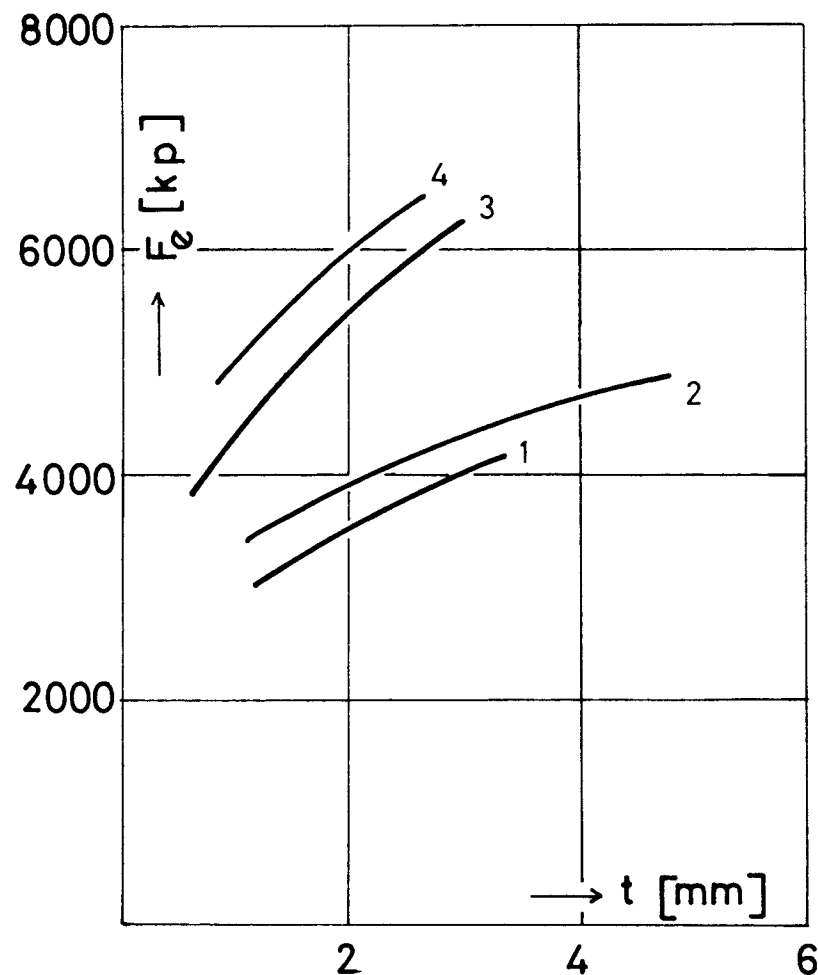


Figure 31 : Effort de pénétration et effort de coupe pour divers modes d'attaque de la roche
 Roche : Grès de la Ruhr Largeur d'enlèvement : 40 mm

1 Surface libre	3 Disposition plane des molettes coupantes
2 Disposition étagée des molettes coupantes (hauteur de redent 40 mm)	4 Entaille (hauteur de redent s_1 : 20 mm)

des diverses dispositions de molettes, calculé à partir de l'effort de pénétration et de l'effort de dégagement interne, on n'enregistre plus alors, parmi les modes d'attaque de roche étudiés, des différences aussi sensibles que dans le cas de l'effort de pénétration. Une attaque de roche qui utilise l'effet d'une surface libre présente encore, il est vrai, des avantages, eu égard à l'effort de coupe. Mais on peut tirer l'importante conclusion suivante : aucune disposition des molettes ne dispense de fournir des efforts de coupe élevés aux arêtes coupantes, si on veut obtenir un processus de fraisage efficace.

L'avantage essentiel d'une attaque rocheuse avec une surface libre ne réside donc pas tant dans un effort de coupe plus faible, mais plutôt dans l'action favorable de l'effort de pénétration et de la profondeur de pénétration. Des molettes coupantes qui tirent parti de l'effet d'une surface libre exigent dans tous les cas des efforts de pénétration plus faibles que des molettes disposées dans un même plan. En outre, des variations relativement faibles de l'effort de pénétration peuvent entraîner des modifications importantes des vitesses de fraisage, pour autant que l'effort de pénétration dépasse une valeur-seuil bien déterminée. Pour différentes duretés de roches, l'attaque favorable offre donc essentiellement une meilleure garantie de pouvoir maintenir des vitesses de fraisage élevées.

En outre, les essais ont révélé que, par analogie avec les efforts de pénétration moins élevés, les efforts de roulement sont aussi plus faibles lorsqu'on fraise en utilisant l'effet d'une surface libre. Un autre avantage essentiel en découle, à savoir une consommation énergétique spécifique moindre pour la fragmentation de la roche.

.../...

4. Application des résultats d'essais à différentes formes de têtes de fraisage

Les relations déterminées à l'aide des mesures d'effort de coupe sont exposées dans ce chapitre sous forme d'exemples numériques et transposées à diverses formes de têtes de fraisage appartenant à d'hypothétiques engins de traçage. Elles font ressortir les implications mécaniques des plus importants résultats expérimentaux.

Comme nous l'avons mentionné au début du rapport, deux types de têtes se prêtent à la réalisation technique d'un meilleur mode de travail des outils de coupe : ce sont, avant tout, une tête de fraisage profilée en W et dont les molettes de coupe effectuent des trajectoires concentriques, ainsi qu'une tête dont les porte-outils sont animés d'un mouvement planétaire. Pour apprécier les propriétés de ces têtes de fraisage de conception nouvelle, il est indispensable de les comparer à une tête de fraisage dont les molettes sont disposées dans le même plan, à la manière traditionnelle. En outre, la transformation de la tête plane de fraisage en tête simplement conique, à faible conicité, constitue un élément intéressant pour la pratique.

Pour obtenir une comparaison sans équivoque entre ces diverses machines, il est opportun de négliger, au cours de la confrontation, les fortes variations de valeurs mesurées et de se baser sur des relations exactes entre les efforts de coupe et les conditions de coupe. A cet effet, il faut présenter clairement, dans l'ensemble des données mesurées, les relations essentielles perceptibles qui sont compatibles avec les limites de confiance déterminées pour chaque fonction prise séparément. Pour la comparaison, il n'est pas essentiel de s'en tenir à une roche étudiée et bien déterminée. Au contraire, on peut mettre en évidence les modes typiques de comportement d'une roche dure abrasive, à l'occasion de l'attaque avec des molettes diversement disposées. Comme on rencontre surtout dans les

.../...

mines de charbon européennes des roches sédimentaires dures, analogues au grès de la Ruhr étudié, on a proposé, pour la roche qui va servir aux calculs et aux comparaisons, des propriétés très étroitement liées à celles du grès de la Ruhr. L'annexe 9, sous forme de représentations graphiques, donne un relevé de toutes les données nécessaires pour les calculs suivants.

4.1 Formes des têtes de fraisage avec trajectoires concentriques des outils de coupe

4.11 Bases de calcul

La vitesse de fraisage d'une tête de coupe à trajectoires concentriques est constituée par le produit de la profondeur de pénétration t et de la vitesse de rotation de la tête de fraisage, n_k , à condition que sur chaque trajectoire ne circule qu'une seule molette coupante. Dès lors, si z molettes sont disposées sur chaque trajectoire, la vitesse de fraisage v_b vaut :

$$v_b = n_k \cdot t \cdot z \quad (1)$$

La vitesse de coupe et la courbure de la trajectoire de coupe n'exercent aucune influence sur l'effort de coupe ; dès lors, le calcul des efforts, moments et puissances motrices agissant sur la tête est très simple.

Dans l'hypothèse de mêmes écartements latéraux b des trajectoires, l'effort de poussée F_v se calcule comme suit :

$$F_v = a_s \cdot z \cdot F_e = \frac{r_b}{b} \cdot z \cdot F_e \quad (2)$$

Dans cette formule, a_s est le nombre de trajectoires de coupe, z le nombre de molettes par trajectoire, r_b le rayon de la voie à creuser (de la tête de fraisage) et F_e l'effort moyen de pénétration à une molette individuelle.

Le couple de la tête de fraisage est la somme de tous les produits de l'effort de roulement d'une molette prise isolément et du rayon de la trajectoire afférente. Vu l'indépendance de l'effort de roulement vis-à-vis de la vitesse de découpe et de la courbure de trajectoire, on obtient de nouveau une formule très simple :

$$M_k = a_s \cdot z \cdot F_r : \frac{r_b}{2} = \frac{r_b^2}{2b} \cdot z \cdot F_r \quad (3)$$

La puissance motrice d'une machine de creusement est déterminée, en pratique, exclusivement par la commande de la rotation. Même pour des vitesses de fraisage maximales réalisables, la puissance nécessaire à l'avance de la machine n'atteint que quelques kW et on peut, dans tous les cas, la négliger vis-à-vis de la puissance nécessaire à la commande du mouvement de rotation. Donc, on peut déterminer la puissance motrice théorique, effective de la machine par la formule bien connue :

$$P_m \text{ [kW]} = \frac{M_k \text{ [kgm]} \cdot n_k \text{ [min}^{-1}\text{]}}{975} \quad (4)$$

Les exemples de calcul qui suivent s'appuient sur ces formules. Pour les différentes têtes de fraisage, on a choisi les données de base qui suivent :

Une seule molette circule sur chaque trajectoire de coupe ($z = 1$). L'écartement latéral entre trajectoires (largeur d'enlèvement) b atteint toujours 50 mm. Un écartement plus important, qui serait souhaitable en vue d'économiser des molettes, devrait être évité en roches dures abrasives pour des raisons relatives à la technique de fragmentation. La vitesse maximale de découpe a été fixée à 1,5 m/s, par analogie avec les valeurs usuelles. Le diamètre de la galerie à creuser doit atteindre trois mètres et, en fonction du choix de la vitesse de coupe maximale admissible, on obtient donc une vitesse de rotation de $9,5 \text{ min}^{-1}$ de la tête

.../...

de fraisage. On a supposé la sollicitation maximale admissible d'une molette atteinte pour un effort de coupe moyen de 9 tonnes. D'une part, jusqu'à cette valeur, les essais ont fourni une bonne confirmation des données ; par ailleurs, au vu des enseignements recueillis lors des essais, il appert qu'actuellement on ne peut vraisemblablement pas encore dépasser sensiblement cette valeur, dans la pratique du fraisage.

4.12 Tête de coupe plane et conique

La Figure 32 montre l'allure de la réduction de l'effort de poussée, du couple et des puissances motrices en fonction de l'augmentation de la conicité de la tête de fraisage. Simultanément, les profondeurs maximales de pénétration t_0 réalisables sans surcharge de la molette augmentent de même, donc, que les vitesses de fraisage à atteindre. Il faut insister sur le fait qu'ici seule l'influence de la conicité est représentée et qu'on n'a pas encore tenu compte de la confection d'une entaille.

Alors que c'est surtout pour des angles coniques plus faibles ($< 45^\circ$) qu'on peut observer des avantages importants vis-à-vis d'une tête plane de fraisage, un accroissement ultérieur de l'angle conique au-delà de 45° n'entraîne que de très faibles améliorations. Si on considère, en outre, qu'une tête de fraisage fortement conique présente d'importants désavantages techniques et qu'au reste la confection de l'entaille devient de plus en plus pénible à mesure qu'augmente la conicité, on doit reconnaître que c'est surtout à une tête dont la conicité est réduite, encore que clairement marquée ($30^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$) qu'est dévolue la plus grande importance pratique, pour l'utilisation de l'effet d'une surface libre.

Pour atteindre une hausse de la vitesse de fraisage au-delà de l'intervalle représenté à la Figure 2, sans accroissement de la charge des molettes coupantes, deux possibilités subsistent :

.../...

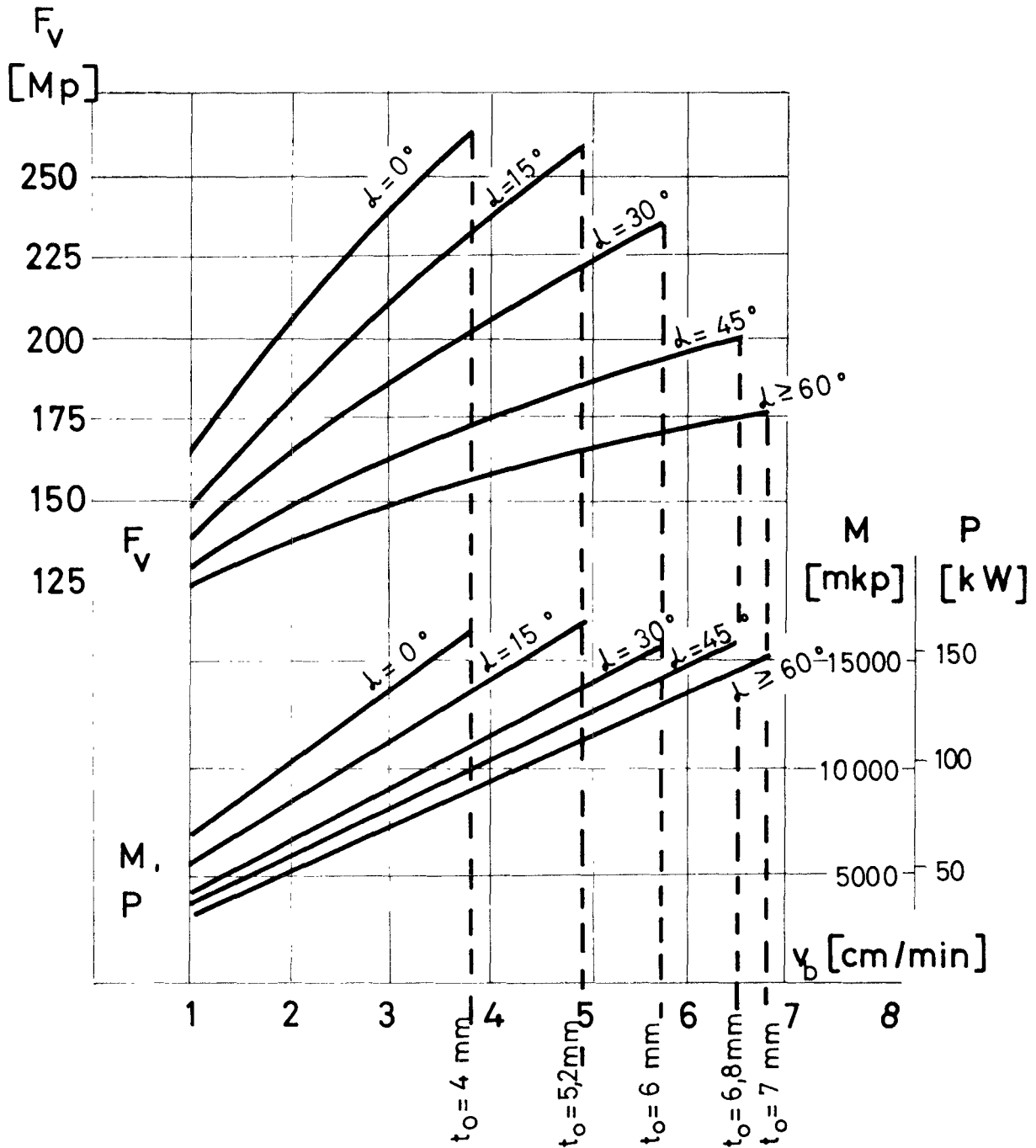


Figure 32 : Vitesse de fraisage, effort de poussée, couple et puissance motrice pour têtes de fraisage de conicité différente (sans entaille)

Diamètre de la tête de fraisage : 3 m

Largeur d'enlèvement : 50 mm

Vitesse de rotation : $9,5 \text{ min}^{-1}$

Charge maximale des molettes coupantes : 9 tonnes

.../...

- a) Réduction de l'effort de coupe par la diminution de l'intervalle latéral entre trajectoires, et
- b) Augmentation du nombre de molettes par trajectoire de coupe.

La Figure 33 représente graphiquement les efforts de ces mesures sur l'effort de poussée et la vitesse de fraisage, pour un angle conique de 45° . En réduisant l'écartement entre trajectoires de 500 mm à 40 ou à 30 mm, l'effort de poussée de la tête de fraisage ne se modifie que très faiblement. Le gain en vitesse de fraisage réalisable est insuffisant pour pouvoir justifier la forte dépense technique supplémentaire entraînée par le plus grand nombre de molettes. Si l'on accroît le nombre de molettes par trajectoire de coupe, en prévoyant par exemple deux molettes par trajectoire au lieu d'une seule, on peut assurément doubler de cette façon la vitesse de fraisage, mais il faut aussi doubler les efforts à la tête de coupe, de sorte que cette solution entraîne des machines trop lourdes. On devrait donc, dans la mesure du possible, fraiser toujours avec une seule molette par trajectoire de coupe et un important écartement des trajectoires, acceptable du point de vue technique de coupe.

Si l'on compare les valeurs pour une tête plate de fraisage et pour une tête de faible conicité ($\alpha = 15^\circ$) avec les données techniques des machines actuelles pour roches dures, on constate que ces valeurs se situent tout à fait dans le même ordre de grandeur. Mais, si on consulte les données publiées à partir de quelques applications de fraisage et relatives à la roche, aux rendements de fraisage et aux charges de molettes, on constate qu'actuellement lors du fraisage de roches dures et abrasives on travaille fréquemment dans le domaine des très faibles profondeurs de pénétration, défavorable au point de vue technique de fragmentation, principalement à cause de la solidité insuffisante des arêtes coupantes et des paliers des molettes. L'évolution future devrait tendre à fournir des efforts plus élevés à l'arête coupante et à les maîtriser. Dans le cas d'une tête de fraisage

.../...

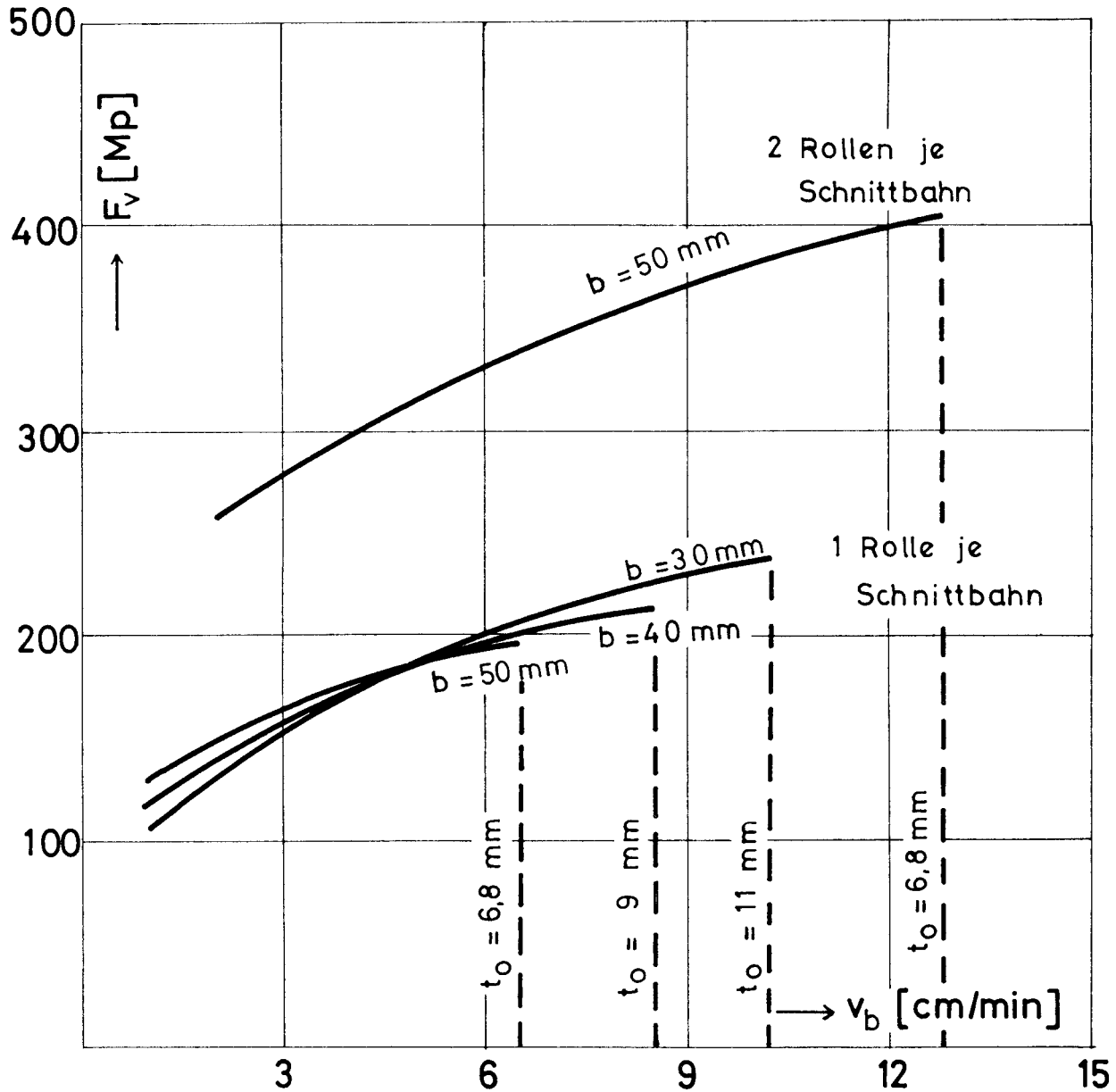


Figure 33 : Vitesse de fraisage et effort de poussée pour diverses présentations de molettes d'une tête de fraisage avec angle conique de 45° (sans entaille)
 Diamètre de la tête de fraisage : 3 m
 Rolle(n) je Schnittbahn = Molette(s) par trajectoire de coupe

plane ou faiblement conique, on atteint donc un processus de fraisage plus efficient, en réduisant les efforts et les puissances motrices par rapport au rendement de fraisage. En cas de profondeurs de pénétration plus importantes, les molettes parcourent un trajet plus faible sur une certaine distance de fraisage et, simultanément, ne se trouvent plus continuellement en contact avec la roche, à cause du cisaillement de plus gros copeaux. On peut dès lors s'attendre à ce que l'usure des arêtes coupantes décroisse. Mais ces avantages ne s'expriment pleinement, en premier lieu, qu'avec une tête de fraisage dotée d'une conicité essentiellement plus forte que ce qui est usuel aujourd'hui. Dans ce cas, la confection d'une entaille acquiert une grande importance.

4.13 Tête de fraisage profilée en W

La partie conique de la tête de fraisage, dont l'angle conique atteint 45° , déjà traitée au cours du chapitre précédent, doit maintenant être complétée par une entaille annulaire. De ce fait, on obtient alors une tête de fraisage apte au travail et réalisable pour une machine de creusement de voie.

Il faut tout d'abord choisir, pour l'entaille aussi, tout comme pour toute la tête restante, un intervalle de trajectoire de 50 mm. On réalise le passage de l'entaille à la partie conique de la tête de fraisage en intercalant un étage de transition dont la hauteur de redent n'atteint que la moitié de sa valeur normale ($s_1 = 25$ mm). La disposition étagée des molettes coupantes sur les parties coniques de la tête de fraisage permet d'atteindre une vitesse de fraisage de 6,5 cm/min., compte tenu de la charge limite fixée à 9 tonnes. En aucun cas, lors de la confection de l'entaille, on ne peut atteindre cette valeur élevée avec une seule molette par trajectoire sans surcharger considérablement les molettes d'entaille et en conséquence sans les détériorer. La Figure 34 montre que, dans ce cas, la vitesse maximale admissible de fraisage serait déjà atteinte à 2,8 cm/min. Pour relever cette limite, il faut augmenter le nombre de molettes affectées

.../...

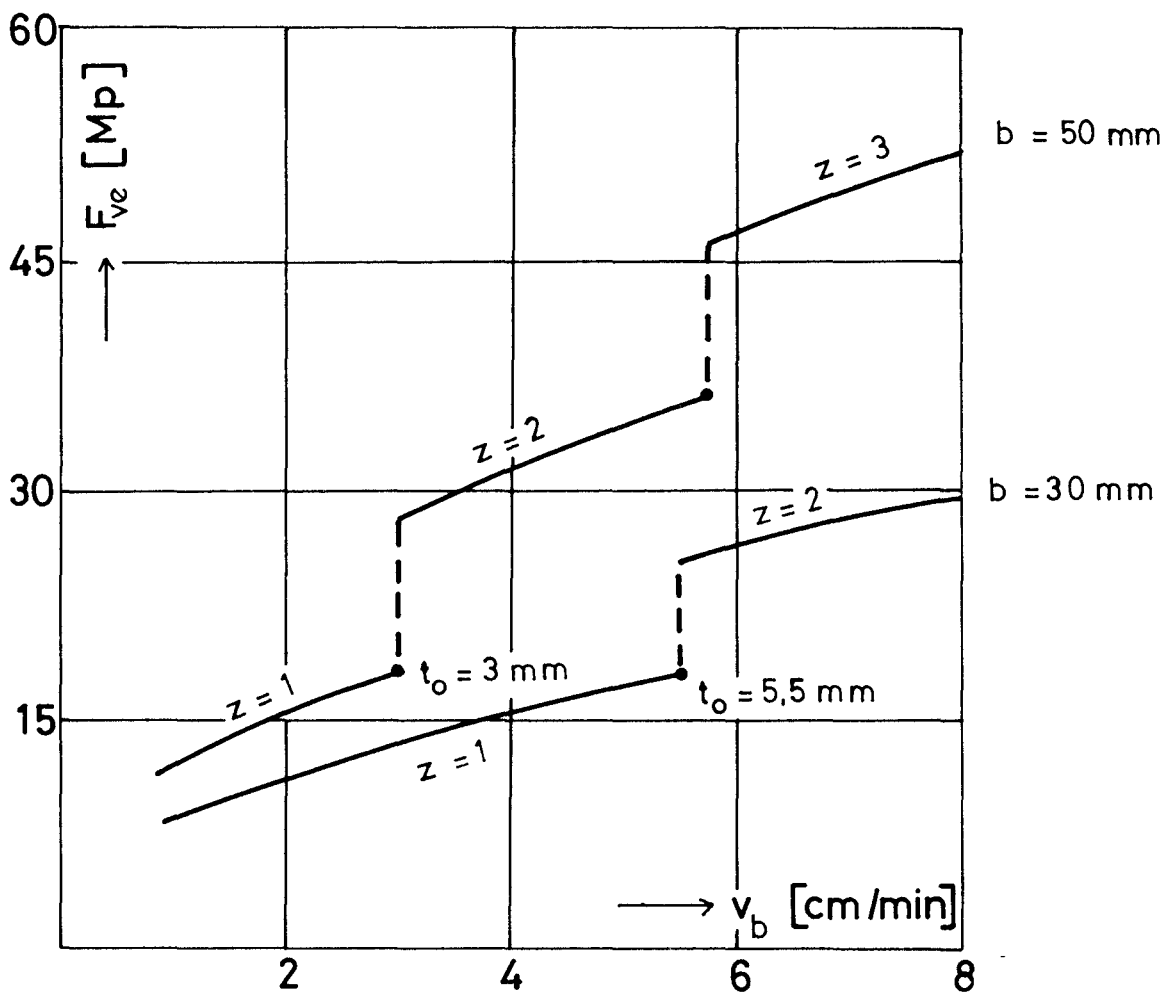


Figure 34 : Effort de poussée pour la confection d'une entaille de 30 et 50 mm de largeur

Hauteur du redent des molettes de coupe voisines

$$: s_1 = \frac{b}{2}$$

Charge maximale des molettes d'entaille : 9 tonnes

z = nombre de molettes par trajectoire de coupe de l'entaille

.../...

à la confection de l'entaille. Rien qu'avec trois molettes par trajectoire de coupe pour l'entaille, on pourrait atteindre sans surcharge, également dans la confection de l'entaille, les vitesses élevées de fraisage des molettes coupantes à disposition étagée. Il en résulte alors une participation très élevée, de l'effort de poussée et du couple relatif à l'entaille, à l'effort total de poussée ou au couple total de la tête de fraisage. On peut réduire d'une manière perceptible cette participation, si on choisit une entaille plus étroite. Les essais l'ont montré : pour tous les modes d'attaque de la roche étudiés, l'effort de pénétration et l'effort de roulement diminuent avec la largeur d'enlevure. On n'a pas étudié expérimentalement de très faibles largeurs d'enlevure (< 40 mm) : en effet, il faut redouter dans ce cas qu'au cours des essais les conditions de la pratique ne puissent plus être simulées avec suffisamment de fidélité. A cet effet, si l'on extrapole les valeurs pour la confection de l'entaille à une largeur d'entaille de 30 mm (Annexe 9.3), on obtient, pour une telle entaille, la valeur de la poussée reprise à la Figure 34. Vis-à-vis de l'entaille plus large, on économise des efforts importants : ceci est à attribuer avant tout au fait que l'on s'accommode à présent de deux molettes au lieu de trois, par trajectoire de coupe.

La Figure 35 compare vitesse de fraisage, effort de poussée, couple et puissance motrice d'une tête de fraisage avec profil en W et entaille annulaire, d'une part, et d'une tête de fraisage plane, de l'autre. Les importantes économies d'efforts, entraînées par la disposition étagée des molettes coupantes, ne sont que partiellement compensées par la confection de l'entaille ; dès lors, dans l'ensemble, on enregistre des avantages importants vis-à-vis d'une tête de fraisage plane. L'avantage du profil en W vis-à-vis d'une tête simplement conique (profil "V") réside surtout dans le fait suivant : on peut obtenir, sans surcharge des molettes, les vitesses importantes de fraisage des molettes à disposition étagée, également lors de la confection de l'entaille, si on choisit convenablement le nombre de molettes intéressées

.../...

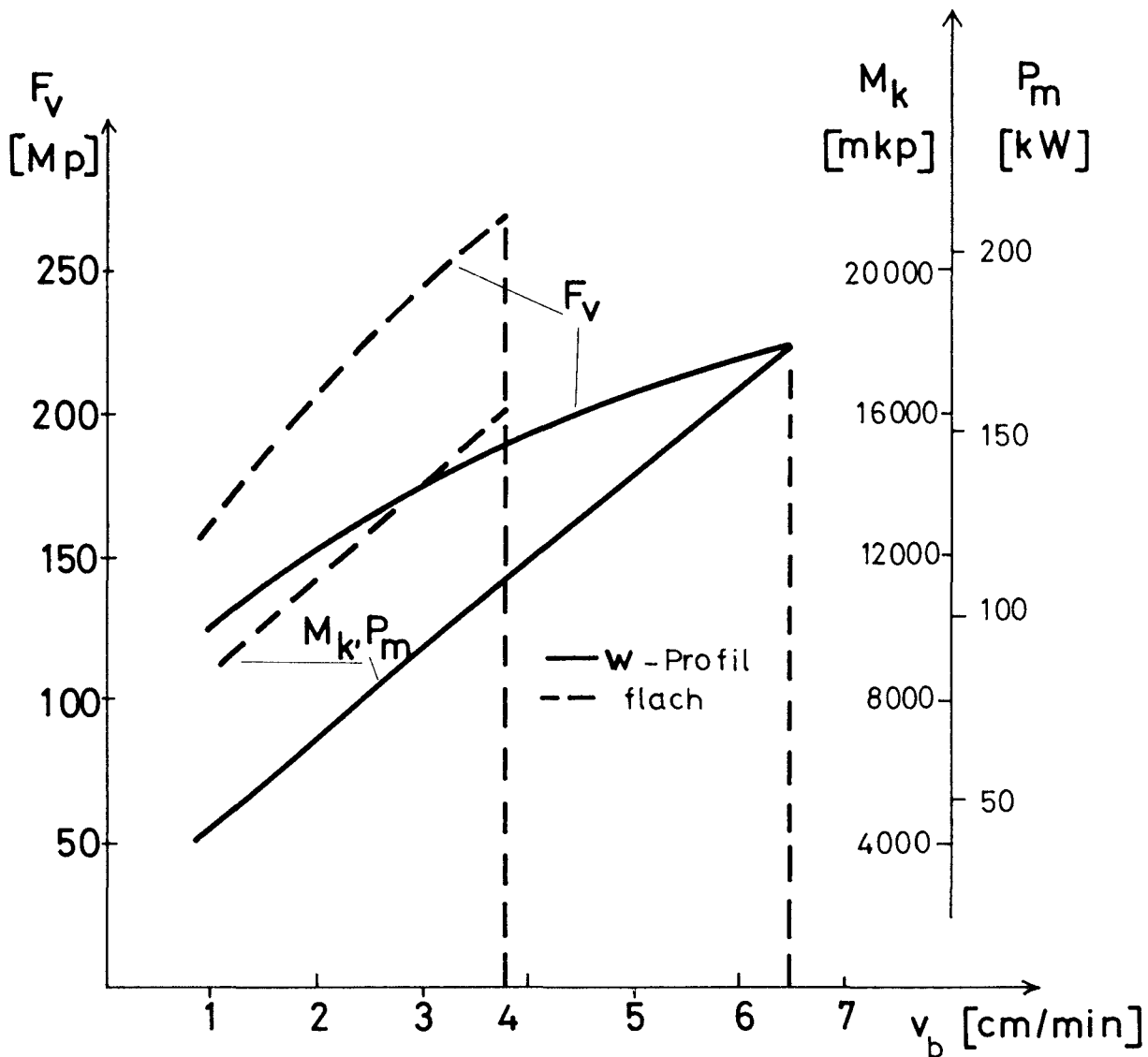


Figure 35 : Vitesse de fraisage, effort de poussée, couple et puissance motrice pour une tête de fraisage profilée en W et pour une tête de fraisage plane
 Diamètre de la tête de fraisage : 3 m
 Largeur d'enlèvement : 50 mm
 Vitesse de rotation : 9,5 min⁻¹
 Charge maximale des molettes coupantes : 9 tonnes
 Flach = plan
 W Profil = profil en W

.../...

à l'entaille, la largeur de l'entaille ainsi que le raccordement à la partie conique de la tête. Cette forme d'entaille offre un espace suffisant qui permet de dimensionner largement les arêtes coupantes et les paliers des molettes. Cependant, avec une tête de fraisage simplement conique qui pratique l'entaille au centre de la voie, il faut au contraire admettre que les importantes vitesses de fraisage indiquées ne peuvent être atteintes en roches dures sans l'intervention d'un dispositif spécial de pré-fraisage. La littérature mentionne les difficultés du découpage central, difficultés qui se présentent déjà dans des conditions nettement plus favorables (8).

4.14 La stabilité directionnelle

En roches homogènes, le système externe de forces agissant sur la tête de fraisage et sur la machine est complètement repris par l'effort de poussée et par le couple de la tête de fraisage. En roches hétérogènes pourtant, par suite des efforts de coupe différents dans les diverses zones rocheuses, on enregistre un ensemble d'efforts et de couples de contrainte qui tendent à dévier la tête de fraisage de sa direction théorique. D'une manière analogue, des efforts et des couples de contrainte doivent être appliqués inversement à la tête de fraisage, lorsqu'on désire modifier l'orientation de creusement de la machine.

Pour la tête de fraisage profilée en W, on enregistre, du fait de sa conicité, un autre système de forces que pour une tête plane. Les mesures d'efforts de coupe réalisées permettent d'obtenir un repère relatif aux efforts et aux couples de contrainte probables avec ces différents types de tête de fraisage. De quelle manière ces efforts influent-ils sur la stabilité d'orientation et sur la "dirigeabilité" de la machine ? On ne peut apprécier cette influence qu'en relation avec des détails constructifs du système de guidage et d'appui.

.../...

Pour le calcul des efforts et des couples de contrainte, on est parti du modèle esquissé ci-après. Si une partie déterminée du front de traçage est plus dure que le reste de la surface creusée, un effort de contrainte résultant agit, en supplément, sur la tête de fraisage, par l'intermédiaire de l'effort de poussée et du couple de cette zone rocheuse dure. L'ampleur, la direction et le point d'application de cet effort varient, entre certaines limites, au cours d'une rotation de la tête de fraisage, en fonction du nombre et de la disposition des molettes qui attaquent précisément la zone rocheuse dure. Pour déterminer la valeur moyenne, on peut faire le raisonnement suivant : l'effort de coupe de chaque molette individuelle qui attaque la zone rocheuse plus dure s'applique en moyenne, au cours du temps, au centre de gravité de sa trajectoire parcourue dans la zone de roche plus dure. Plus longtemps la molette demeure dans la partie rocheuse dure, plus grand aussi est l'angle au centre de sa trajectoire parcourue et plus importante est sa contribution à la moyenne de l'effort de contrainte résultant. Sur cette base, on peut calculer l'effort de contrainte résultant et son point d'application en additionnant tous les efforts individuels des molettes coupantes qui s'attaquent à la partie rocheuse dure. De ce fait, on connaît également le couple engendré par cet effort autour d'un centre de rotation quelconque, fictif de la machine.

Avec une tête plane de fraisage, en pratique, seuls les efforts de pénétration différents aux molettes coupantes provoquent une déviation d'orientation de la tête de fraisage. Du fait d'une zone de roche dure, il se produit un effort résultant dirigé parallèlement à l'axe longitudinal de la machine ; cet effort engendre un moment qui tend à faire tourner la machine dans la roche plus dure, autour d'un axe perpendiculaire à l'axe longitudinal de la machine. La Figure 36 illustre cette relation. On a représenté l'effort de contrainte résultant, pour diverses répartitions de deux roches de dureté différente,

.../...

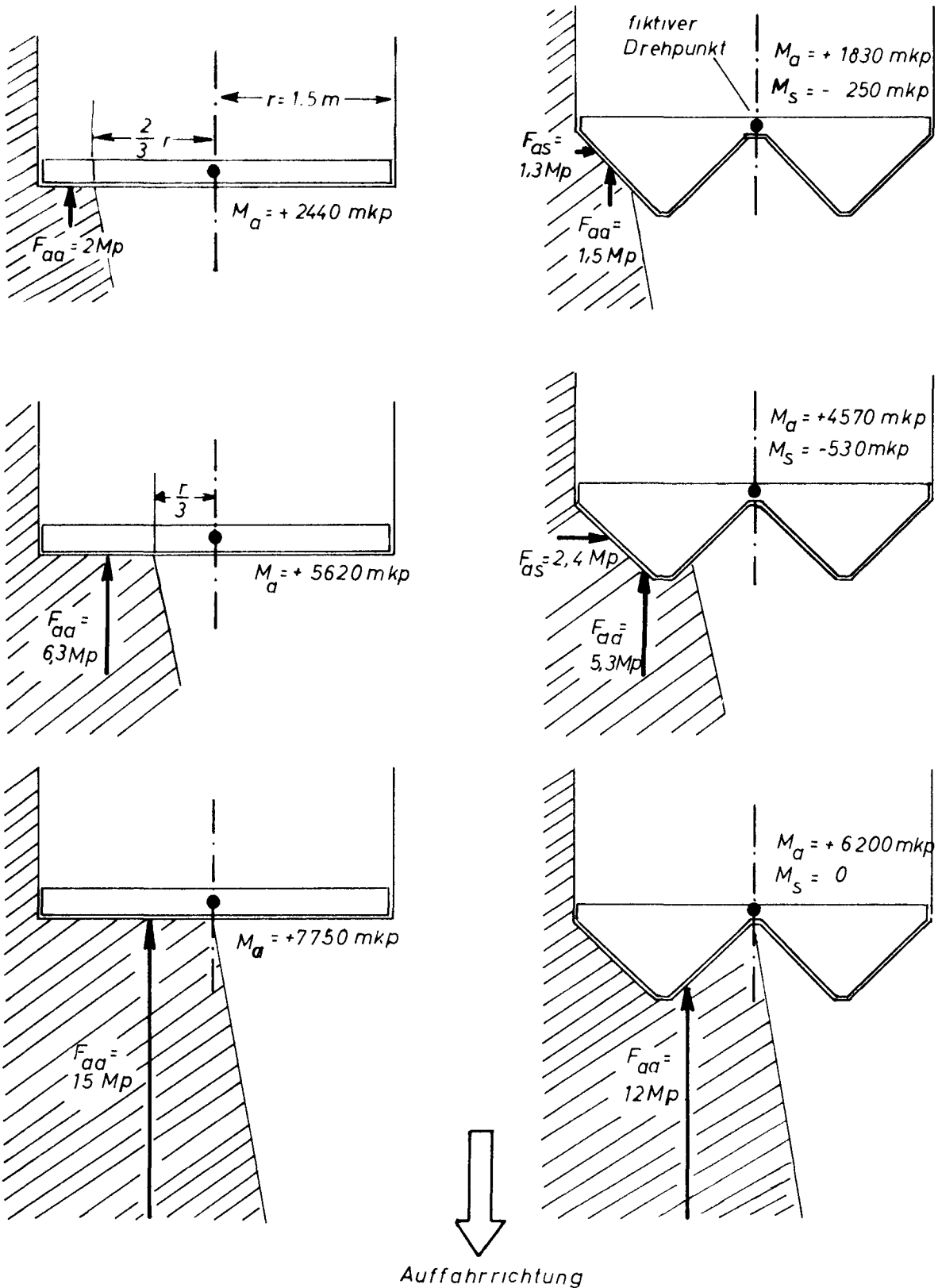


Figure 36 : Efforts et moments de contrainte à une tête plane de fraisage et à une tête profilée en W, lors de la traversée de roches de résistances différentes (différence de 1000 kg entre les efforts de pénétration pour la disposition plane, en roche plus dure et en roche plus tendre)

▨ Roche plus dure

□ Roche plus tendre

Fiktiver Drehpunkt = Centre de rotation fictif

Auffahrriichtung = Direction de creusement

dans la section de la voie, comme on peut en rencontrer lors de la recoupe d'une limite de couche ou d'un dérangement. On a de nouveau choisi une tête de fraisage de 3 mètres de diamètre avec un intervalle entre trajectoires de 50 mm et une molette coupante par trajectoire. Le calcul des valeurs de l'effort de contrainte repose sur une différence de l'effort de pénétration de 1000 kg entre roche plus dure et roche plus tendre.

Dans le cas d'une tête conique de fraisage, une dureté différente de la roche n'entraîne pas seulement des efforts de pénétration différents, mais aussi des efforts de dégagement interne distincts. Ceux-ci provoquent un effort de contrainte résultant qui tend à repousser la tête de fraisage de la partie de roche plus dure. De ce fait, il s'ensuit une certaine compensation de l'effort de contrainte à cause des efforts de pénétration différents : cette compensation tend à faire pivoter la tête de fraisage dans la roche plus dure. La Figure 36 montre cette relation pour la tête de fraisage profilée en W, étudiée au chapitre 4.13. Pour le calcul des efforts, on a supposé la même charge aux molettes (9 tonnes) aussi bien pour la disposition plane que pour la disposition étagée des molettes coupantes. Dans le cas de la disposition étagée, cette charge se divise vectoriellement en une partie provenant de l'effort de pénétration et en une partie provenant de l'effort de dégagement interne : on peut supposer ces parties égales à environ $\frac{3}{4}$ ou $\frac{2}{3}$ de l'effort de coupe. En conséquence, on a établi, pour les différentes parties rocheuses, une différence de 750 kg dans l'effort de pénétration et de 666 kg dans l'effort de dégagement interne. Ainsi donc, aussi bien l'effort de contrainte attribuable aux efforts de pénétration (F_{aa}) que l'effort attribuable aux efforts de dégagement interne (F_{as}) sont plus faibles que l'effort de contrainte s'appliquant à une tête plane de fraisage. Au cas où la zone rocheuse plus dure recouvre le domaine de l'entaille, une partie de l'effort latéral de contrainte F_{as} est compensée. Enfin, lorsque la roche

.../...

plus dure apparaît précisément sur une moitié de galerie, aucun effort latéral de contrainte n'est plus efficace à cause de l'appui mutuel du cône interne et du cône externe. Comme dans le cas de la tête plane de fraisage, seul un effort de contrainte agit encore parallèlement à l'axe longitudinal, effort qui est pourtant déjà plus faible avec la tête de fraisage profilée en W.

Ces développements montrent qu'à plusieurs égards la tête de fraisage profilée en W présente de meilleures propriétés pour la stabilité directionnelle qu'une tête plane de fraisage. La question du maintien de la direction et de la "dirigeabilité" de la machine n'est sûrement pas entièrement élucidée de ce fait. Mais il est possible de ménager des impulsions pour une étude ultérieure de cette question. Il faudrait simplement souligner ici que pour ce problème également les mesures d'effort de coupe réalisées peuvent fournir des points de repère précieux. Elles montrent, finalement, que de graves défauts relatifs au contrôle de la direction de la machine contrarient la réalisation de la tête de fraisage profilée en W.

4.2 Têtes coupantes avec porte-outils en rotation du type planétaire

4.21 Le calcul des conditions de découpe et de la vitesse de creusement

Pour déterminer la vitesse de creusement ainsi que les efforts, moments et puissances d'entraînement nécessaires, il faut d'abord élucider les relations entre les conditions de découpe et le mode de fonctionnement ainsi que les caractéristiques techniques de la machine.

.../...

Les conditions de découpe relatives à une molette sur une telle tête de fraisage concernent la vitesse de découpe, la largeur d'enlevure et la profondeur de pénétration.

La vitesse de coupe v_s n'a aucune influence sur les efforts, et est en outre constante pour toutes les molettes. Il faut uniquement observer le respect d'une valeur maximale ; ainsi l'usure des molettes reste dans des limites supportables. La vitesse de coupe résulte du nombre de tours n_t et du rayon r_{ts} du cercle de coupe d'un porte-outils :

$$v_s = 2 \pi \cdot r_{ts} \cdot n_t \quad (5)$$

La largeur d'enlevure est l'avancement de la tête coupante par révolution, si un seul porte-outils se déplace en rotation. Si plusieurs (z_t) porte-outils existent par zone planétaire, à avancement égal (vitesse de creusement v_b égale) et à même nombre de tours n_k de la tête coupante, la largeur d'enlevure b est plus faible. A chaque zone planétaire correspond l'équation :

$$b = \frac{v_b}{z_t \cdot n_k} \quad (6)$$

La largeur d'enlevure peut être réglée en continu par le rapport $\frac{v_b}{n_k}$.

Essentiellement plus complexes sont les rapports des déplacements, si la profondeur de pénétration doit être fixée. Sur la Figure 37 sont représentées les trajectoires de coupe de deux molettes consécutives sur le porte-outils. Si la tête coupante et les porte-outils tournent dans le même sens, chaque trajectoire de coupe forme une épicycloïde entrelacée. La distance entre trajectoires de deux molettes consécutives donne un repère pour la profondeur de pénétration ; durant une rotation du porte-outils de 180° , elle varie continûment entre 0, au sommet supérieur, et un maximum, puis revient à 0. Il en résulte que le concept "profondeur de pénétration" dans sa signification usuelle ne peut du tout s'appliquer aux trajectoires de coupe

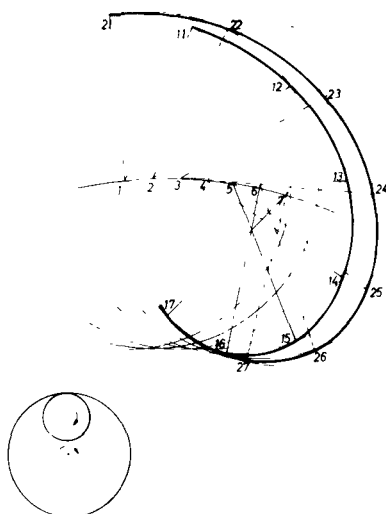


Figure 37 : Trajectoires de coupe de deux molettes consécutives

cycloïdales. Pour pouvoir calculer la profondeur de pénétration, il faut d'abord déterminer avec précision le sens de ce concept dans le cas de trajectoires de coupe cycloïdales. D'après la Figure 38 on a découvert la définition suivante :

A un endroit quelconque de la trajectoire de coupe, caractérisé par l'angle ψ_i , la profondeur de pénétration est le déplacement effectué par la molette R_i suivant la direction radiale du porte-outils, par rapport à la molette précédente R_{i+1} , lorsque celle-ci a pris également une position caractérisée par le même angle ψ_i . Sur la base de cette définition, on peut établir l'équation suivante concernant la profondeur de pénétration t , pour une position quelconque, caractérisée par l'angle ψ :

$$t = 2 r_k \cdot \sin \frac{\pi}{a_r (c \pm 1)} \cdot \cos \left(\frac{\pi}{a_r (c \pm 1)} + \frac{\pi}{2} - \psi \right) \quad (7)$$

avec a_r = le nombre de molettes coupantes du porte-outils,

$c = \frac{n_t}{n_k}$ le rapport entre la vitesse angulaire du porte-outils et celle de la tête coupante.

r_k = la distance du centre du porte-outils au centre de la tête coupante.

.../....

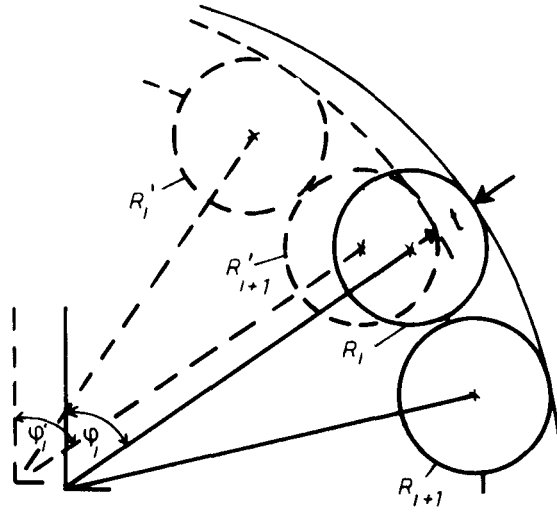


Figure 38 : Définition de la profondeur de pénétration dans le cas de trajectoires de coupe cycloïdales

Le signe + s'applique à la rotation dans le même sens de la tête coupante et du porte-outils ; le signe -, dans le cas de sens contraires.

Cette formule peut être remplacée avec une bonne approximation par une forme appropriée nettement plus simple. En pratique, l'angle $\frac{\pi}{a_r (c \pm 1)}$ est toujours très faible (inférieur à $1,5^\circ$), pour permettre le maintien de conditions de coupe raisonnables. On peut donc remplacer le sinus de cet angle par l'angle lui-même exprimé en radians. Dans des conditions raisonnables de coupe, le rapport c des vitesses de rotation garde des valeurs numériques inférieures à 15-20. Pour les considérations ultérieures, la formule reste donc suffisamment précise, si le terme ± 1 est négligé devant c . En outre l'angle $\frac{\pi}{a_r (c \pm 1)}$ peut être négligé par rapport à l'angle $\frac{\pi}{2} - \varphi$.

La profondeur de pénétration peut donc s'exprimer par la formule simplifiée suivante :

$$t = \frac{2 \pi r_k}{a_r \cdot c} \cdot \sin \varphi = t_{\max} \cdot \sin \varphi \quad (8)$$

.../...

Ainsi, la profondeur de pénétration peut être déterminée de manière simple en fonction de l'angle φ . La constante $\frac{2 \pi r_k}{a_r \cdot c}$ représente la profondeur maximale de pénétration t_{\max} .

Elle est atteinte pour l'angle $\varphi = 90^\circ$. Sa grandeur est déterminée à la fois par les caractéristiques constructives r_k et a_r , et par le rapport c des vitesses de rotation, ce qui permet de la régler continûment.

L'étude analytique des rapports des déplacements de la tête de fraisage permet alors de se fixer avec précision les vitesses de creusement accessibles. D'après la formule (6), la vitesse de creusement s'exprime par :

$$v_b = z_t \cdot n_k \cdot b \quad (9)$$

D'après la formule (8), le nombre de tours n_k de la tête de fraisage dépend de la profondeur maximale de pénétration t_{\max} et du nombre de tours n_t du porte-outils :

$$n_k = \frac{1}{2 \pi} \cdot \frac{a_r}{r_k} \cdot t_{\max} \cdot n_t \quad (10)$$

D'après la relation (5), le nombre de tours du porte-outils dépend à son tour de la vitesse de coupe choisie :

$$n_t = \frac{v_s}{2 \pi r_{ts}} \quad (11)$$

Ces fonctions peuvent être rassemblées sous forme synthétique dans une formule concernant la vitesse de creusement, si l'on introduit les égalités (10) et (11) dans la relation (9) :

$$v_b = \boxed{b \cdot t_{\max} \cdot v_s} \cdot \boxed{\frac{a_r}{r_{ts}} \cdot \frac{z_t}{r_k}} \cdot \frac{1}{4 \pi^2} \quad (12)$$

La première partie de cette formule retient les conditions de découpe à une molette isolée ; la deuxième partie, les caractéristiques purement constructives de la tête de fraisage. Ainsi, en respectant, dans les conditions de coupe, des valeurs maximales déterminées, pour ne pas surcharger les molette coupantes,

on peut attribuer, à chaque modèle de tête de fraisage, la vitesse de creusement maximale réalisable.

Maintenant que les conditions de découpe, lors du processus de fraisage, peuvent être fixées à chaque molette coupante, les efforts de coupe aux différentes molettes sont déterminées à leur tour, sur la base de mesures effectuées sur ces efforts. Au stade suivant, les efforts d'ensemble les plus intéressants du système porte-outils - tête de fraisage peuvent être calculés à partir des efforts de coupe élémentaires.

4.22 Le calcul des efforts et des moments agissant à la tête de fraisage

L'obtention de l'effort de poussée, sur les porte-outils et sur l'ensemble de la tête de fraisage, s'établit très simplement. Pour les calculs à effectuer ici, on peut supposer, avec une précision suffisante, que le front de voie attaqué s'étend normalement à l'axe de la voie. Avec le mode d'attaque caractérisant la tête de fraisage à mouvement planétaire, les efforts de dégagement interne affectant les molettes coupantes doivent être surmontés dans le sens d'avancement de la machine. L'effort de poussée s'obtient donc en additionnant les efforts moyens de dégagement interne de toutes les molettes.

Notablement plus complexes sont les rapports entre les efforts dans le plan du front de traçage. A ce propos, considérons d'abord les composantes F_e et F_r de l'effort de coupe agissant dans ce plan sur une molette coupante unique et quelconque, à un instant quelconque (Figure 39). Par l'intermédiaire des supports de molettes, ces efforts agissent au périmètre du porte-outils, et donc aussi à l'axe de ce dernier. De même, cet axe sur le plateau de la tête de fraisage est relié, de manière rigide, au centre de la tête de fraisage. Les efforts et les moments dans ce système peuvent être calculés par la décomposition des efforts et en utilisant les deux

.../...

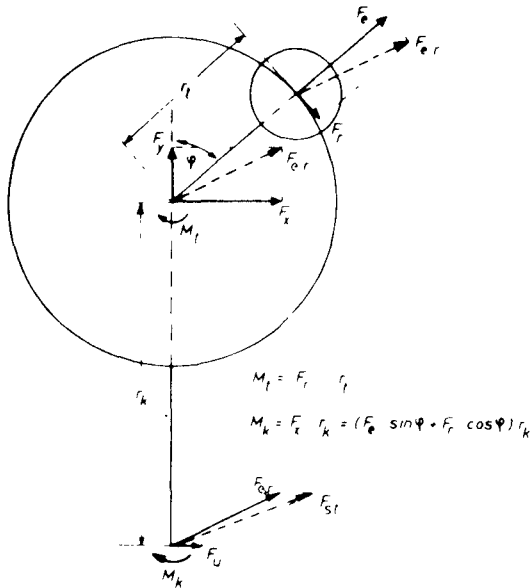


Figure 39

Efforts et moments dans le système porte-outils - tête de fraisage, en partant de l'effort de coupe agissant sur une molette isolée

conditions fondamentales de l'équilibre statique : la somme de tous les efforts et la somme de tous les moments doivent être nulles. On obtient donc les efforts et les moments dessinés sur la Figure 39, où les flèches représentent dans chaque cas, les efforts à fournir à la machine (= efforts agissants).

L'effort de roulement F_r est provoqué par le couple M_t du porte-outils. Le couple de réaction tend à faire tourner la tête de fraisage autour du centre du porte-outils, et doit être équilibré par un effort périphérique F_u correspondant, qui s'applique au centre de la tête de fraisage. La résultante $F_{e,r}$ de l'effort de pénétration et de l'effort de roulement doit être appliquée, en tant qu'effort d'appui, à l'axe du porte-outils. Une partie de cet effort, à savoir la composante dans le sens des x (F_x), est produite par le couple M_k de la tête de fraisage qui doit être calculé à partir de F_e et de F_r . Le couple de réaction de la tête de fraisage doit être transmis au massif par le dispositif d'étañonnement de la machine.

En outre l'effort d'ensemble agissant à l'axe du porte-outils, en même temps que l'effort périphérique cité F_u , doivent être appliqués en tant qu'effort d'appui F_{st} , au centre de la tête de fraisage. Celui-ci également est dévié vers le massif par le système d'étalement.

Pour équilibrer les efforts agissant au centre de la tête de fraisage seule une tête symétriquement construite par rapport au centre apparaît raisonnable. Dans le cas le plus simple, il faudrait ainsi disposer 2 porte-outils diamétralement opposés. En massif homogène, il suffit alors de développer à la tête de fraisage l'effort d'avancement et le couple de la tête de fraisage. Cependant, dès que le massif n'est pas homogène et que des efforts différents sont appliqués aux porte-outils, même une tête de fraisage construite symétriquement subit des efforts supplémentaires qui tendent à faire dévier la machine. Ces efforts perturbateurs de déviation sont théoriquement calculables, mais ne doivent pas être étudiés plus avant dans ce rapport.

Partant de l'effort de coupe sur une molette isolée, considéré jusqu'à présent, on en vient à l'effort d'ensemble par des considérations évoquées ci-dessous. La Figure 40 montre un porte-outils à nombre déterminé de molettes a_r , possédant un domaine d'attaque déterminé, mesuré par l'angle φ_e . La position représentée des outils de coupe se reproduit périodiquement, après une rotation du porte-outils d'un angle $\frac{2\pi}{a_r}$. En parallèle, les efforts et les moments agissant au porte-outils varient continuellement et périodiquement entre des limites déterminées. Pendant une rotation vers l'avant de l'angle $\frac{2\pi}{a_r}$, la valeur moyenne dans le temps d'une composante de l'effort de coupe à une $i^{\text{ème}}$ molette quelconque s'exprime par :

$$\bar{F}_i = \frac{\int_{\varphi_i}^{\varphi_{i+1}} F(\varphi) d\varphi}{\frac{2\pi}{a_r}} \quad (13)$$

.../...

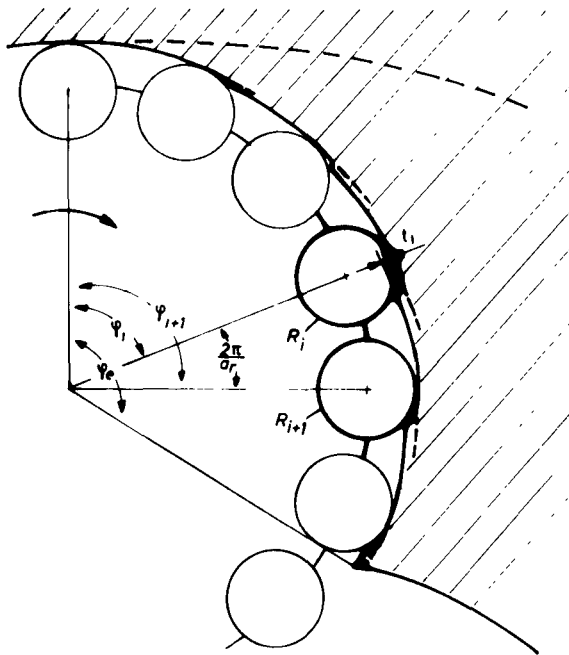


Figure 40

Obtention d'un effort d'ensemble agissant sur le porte-outils à partir des efforts élémentaires des molettes coupantes

Dans cette formule, $F(\varphi)$ est la relation entre une composante de l'effort de coupe et l'angle φ , qui détermine l'effort de coupe au moyen de la profondeur de pénétration.

L'effort moyen d'ensemble \bar{F}_t agissant sur le porte-outils est alors la somme des efforts élémentaires moyens des p molettes en contact avec la roche :

$$\bar{F}_t = \bar{F}_1 + \bar{F}_2 + \dots + \bar{F}_i + \dots + \bar{F}_{p-1} + \bar{F}_p$$

$$\bar{F}_t = \frac{\int_0^{\varphi_e} F(\varphi) d\varphi}{\frac{2\pi}{a_r}} = \frac{\varphi_e}{2\pi} \cdot a_r \cdot \bar{F}_{\varphi_e} \quad (14)$$

Cette égalité signifie que la valeur moyenne \bar{F}_t d'un effort, agissant sur un porte-outils et résultant d'une composante déterminée de l'effort de coupe, peut être obtenue à partir de la valeur moyenne \bar{F}_{φ_e} des composantes correspondantes de

.../...

l'effort de coupe d'une molette sur toute son aire d'attaque γ_e . Il reste à multiplier ce dernier effort uniquement par le nombre a_r des molettes fixées sur le porte-outils, de même que par le rapport $\frac{\gamma_e}{2\pi}$ entre l'angle d'attaque et le cercle complet ; on obtient alors \bar{F}_t .

Avec ce mode de représentation, on obtient des formules très simples et très claires concernant les efforts d'avancement et les couples du porte-outils et de la tête de fraisage.

Effort d'avancement d'un porte-outils :

$$F_{vt} = \frac{\gamma_e}{2\pi} \cdot a_r \cdot \bar{F}_f \gamma_e \quad (15)$$

Couple d'un porte-outils :

$$M_t = \frac{\gamma_e}{2\pi} \cdot a_r \cdot r_t \cdot \bar{F}_r \gamma_e \quad (16)$$

Participation d'un porte-outils au couple de la tête de fraisage :

$$M_{kt} = \frac{\gamma_e}{2\pi} \cdot a_r \cdot r_k \cdot \bar{F}_x \gamma_e \quad (17)$$

Couple et effort de poussée de la tête de fraisage s'obtiennent en additionnant les participations correspondantes des différents porte-outils. Les puissances installées pour un porte-outils et pour la tête de fraisage peuvent être obtenues de manière classique à partir de leurs vitesses de rotation et de leurs couples.

Le calcul des valeurs moyennes $\bar{F}_f \gamma_e$, $\bar{F}_r \gamma_e$ et $\bar{F}_x \gamma_e$ exige un long travail comportant des opérations sans cesse répétées. On établit donc un programme pour le calcul de ces valeurs, avec calculatrice électronique. Pour différentes conditions de découpe (profondeur de pénétration maximale t_{\max} , largeur d'enlèvement b) et pour différentes zones d'attaque γ_e , les efforts en question peuvent être calculés à partir de données de mesure à fournir. A partir des valeurs moyennes

.../....

calculées, on peut alors facilement et de la manière indiquée obtenir efforts de poussée, couples et puissances installées pour différentes constructions de tête de fraisage.

4.23 Influence des conditions de découpe

La Figure 41 montre les influences de différentes conditions de coupe (t_{\max} , b) s'exerçant sur la vitesse de creusement et sur les efforts actifs au porte-outils. En abscisse, on porte le produit de la profondeur maximale de pénétration t_{\max} et de la largeur d'enlevure b . D'après la formule (12), ce produit est un repère pour la vitesse de creusement. La vitesse de creusement réelle pour une tête de fraisage quelconque peut alors être calculée aisément d'après cette formule. L'ordonnée porte les efforts moyens \bar{F}_{f180° , \bar{F}_{r180° et \bar{F}_{x180° d'une molette coupante, dans la totalité de sa zone d'attaque choisie de manière à intéresser la moitié des porte-outils ($\gamma_e = 180^\circ$). Par ces grandeurs, on obtient les efforts, moments et puissances installées pour un porte-outils et pour la tête de fraisage, et cela à partir des formules (15) - (17). Le paramètre des efforts représentés est la largeur d'enlevure b . L'évolution des efforts en fonction de la vitesse de creusement (= profondeur maximale de pénétration à largeur d'enlevure constante) est représentée jusqu'à une charge maximale de 9 T à la molette coupante.

\bar{F}_{f180° et \bar{F}_{r180° augmentent quasi linéairement avec la profondeur maximale de pénétration (vitesse de creusement). Ainsi l'effort de poussée et le couple du porte-outils, rapportés au volume de débris abattus, ne peuvent pratiquement être influencés par différentes profondeurs maximales de pénétration. Au contraire, \bar{F}_{x180° augmente très dégressivement si la profondeur maximale de pénétration augmente, car cette composante est déterminée en premier lieu par l'effort de pénétration. Pour obtenir un couple le plus faible possible à la tête de fraisage (rapporté au volume des débris abattus), il faudrait donc s'efforcer d'avoir des profondeurs maximales de pénétration importantes.

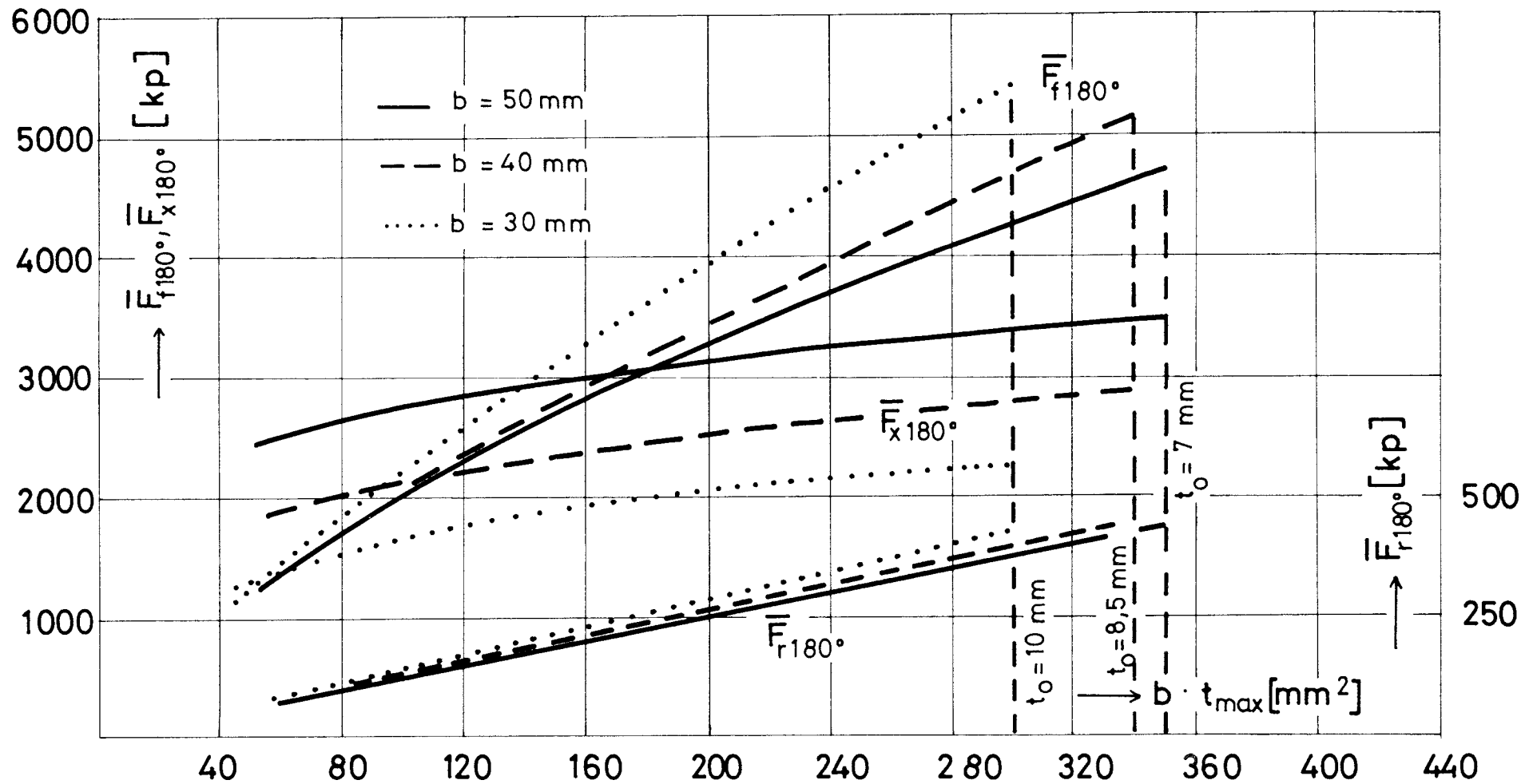


Figure 41 : Influences exercées par les conditions de découpe sur la vitesse de creusement et sur les efforts agissant au porte-outils

Zone d'attaque : $\varphi_e = 180^\circ$

Charge la plus élevée sur les molettes coupantes : 9 tonnes

kp = kg

Outre la profondeur maximale de pénétration, il faut aussi, avec les machines à tête de fraisage à mouvement planétaire, régler la largeur d'enlevure. Ceci constitue une différence essentielle par rapport aux machines à trajectoires de coupe concentriques. Pour atteindre la même vitesse de creusement, il faut, si la largeur d'enlevure augmente, fournir des moments plus élevés à la tête de fraisage car, à coup sûr, les efforts de pénétration augmentent très fortement avec la largeur d'enlevure. Cependant l'effort de poussée de la machine diminue. Ceci est explicable comme suit : les efforts de dégagement interne ne croissent que peu avec la largeur d'enlevure. Cependant, à largeur d'enlevure plus grande, il faut des profondeurs maximales de pénétration plus faibles pour obtenir une vitesse de creusement déterminée, et l'effort de dégagement interne est déterminé en majeure partie par la profondeur de pénétration ; donc dans l'ensemble, avec des avancements plus grands, les efforts de poussée seront un peu plus faibles. Le 3ème effort, concernant le couple au porte-outils, n'est, à vitesse de creusement constante, que peu influencé par la largeur d'enlevure. Il est vrai que les efforts de roulement, eux aussi, augmentent avec la largeur d'enlevure ; cependant cette augmentation est largement compensée par les profondeurs de pénétration plus faibles dans le cas de fortes largeurs d'enlevure.

En cas de largeurs d'enlevure plus importantes, la limite de charge des molettes coupantes est seulement atteinte pour des vitesses de creusement quelque peu plus élevées. Avec une tête de fraisage à trajectoires de coupe concentriques au contraire, des largeurs d'enlevure plus importantes ont conduit à un abaissement de la vitesse de creusement réalisable.

Les relations décrites prouvent que l'on ne peut déclarer d'emblée quel mode d'utilisation il faut rechercher pour la machine, car il n'existe aucune profondeur de pénétration ni aucune largeur d'enlevure "optimales". S'il faut atteindre une vitesse de creusement la plus élevée possible sans dépasser la charge permise sur les molettes, des largeurs d'enlevure plus élevées sont avantageuses. Cependant, il faut alors développer des couples élevés à la tête de fraisage. Si ces couples

doivent rester faibles, des largeurs d'enlevure plus petites et des profondeurs de pénétration plus grandes sont favorables. A ce moment certes, il faut supporter des efforts de poussée un peu plus importantes. L'ajustement entre la largeur d'enlevure et la profondeur de pénétration concerne aussi la structure des paliers et la fixation de la molette coupante. Le rapport entre effort de pénétration et effort de dégagement interne, donc également la direction de l'effort de coupe appliqué, sont fortement influencés par la largeur d'enlevure et la profondeur de pénétration. Dans le choix de la largeur d'enlevure, il faudrait aussi observer le fait suivant : avec de fortes largeurs d'enlevure et de petites profondeurs de pénétration, nécessaires pour ne pas surcharger la molette, le danger existe que la molette coupante ne reste en contact avec la roche sur une longue partie de sa trajectoire de coupe. On peut admettre que cette manière de travailler, difficile à concevoir du point de vue technique d'essai, provoque des efforts plus élevés (rapportés aux volumes de débris abattus) et une usure plus importante des molettes. Ne fût-ce que pour ce seul motif, la largeur d'enlevure ne doit pas excéder 5 cm. environ, si l'on veut actuellement découper avantageusement les roches dures.

4.24 Influence de la configuration de la tête de fraisage

Il existe des possibilités nombreuses, théoriquement infinies, pour la structure de la tête de fraisage. Il faut mettre en évidence deux formes qui semblent répondre au but cherché. Sur celles-ci, on pourra montrer l'influence de modifications constructives fondamentales, et en même temps se faire une idée de l'importance des vitesses de fraisage, des efforts et des puissances d'entraînement sur lesquels il faut compter.

Il faut partir, comme jusqu'à présent, d'une machine de trois mètres de diamètre. L'exécution la plus simple compterait seulement deux porte-outils. Une telle machine atteint une vitesse de fraisage vraiment faible. Pour l'augmenter, il faut choisir

.../...

trois porte-outils. En même temps, cela procure un étauçonnement mutuel plus favorable du porte-outils qui peut être utile, particulièrement en roche non homogène.

Une répartition de la tête coupante en plusieurs zones planétaires promet des avantages certains. Le plus simple serait de la partager en deux zones à deux porte-outils chacune, présentant un angle d'attaque φ_e de 180° , et disposées symétriquement, assurant ainsi l'équilibre des efforts. Les formules (15) à (17) permettent de prévoir aisément l'influence exercée par cette modification de la tête de fraisage, dessinée sur la Figure 42, sur un modèle simple.

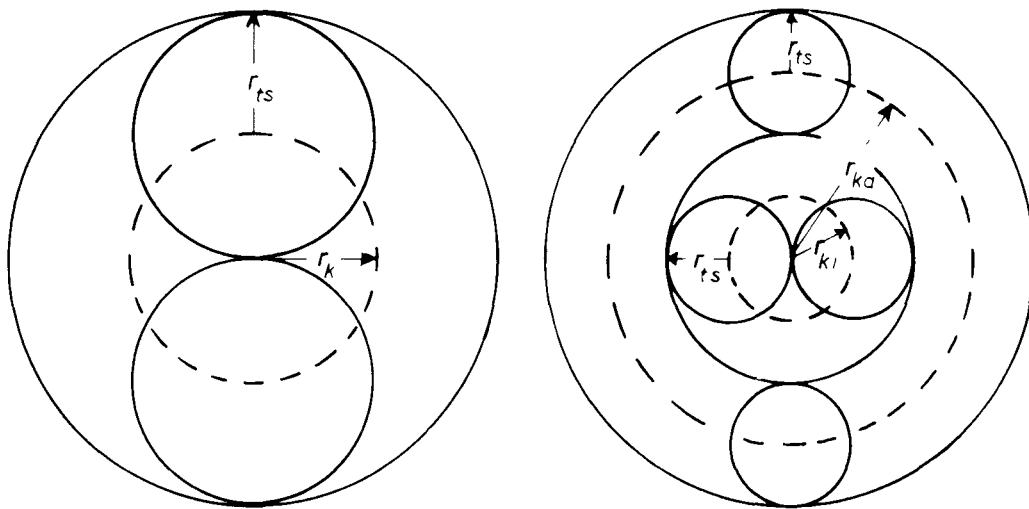


Figure 42 : Tête de fraisage à une zone planétaire (à gauche) et à deux zones planétaires (à droite)

$$r_{ts} \text{ 2 zones } = \frac{1}{2} r_{ts} \text{ 1 zone}$$

On prend comme base que, pour obtenir des vitesses de fraisage élevées, on dispose toujours, sur le porte-outils, autant de molettes que possible et qu'en outre le diamètre des molettes est constant. Dans ce cas, le nombre de molettes a_r par porte-outils est proportionnel au diamètre r_t de ce dernier. En se fondant sur cette relation et sur les formules énoncées, on peut voir que, à conditions de coupe identiques, l'effort de poussée et le couple de l'ensemble de la tête de fraisage ne se modifient pas.

.../...

Cependant, dans le cas de la tête de fraisage à deux zones planétaires, le couple des porte-outils, partant leur puissance d'entraînement, sont réduits à un quart : en effet, selon la condition énoncée, ce moment est proportionnel au carré du rayon du porte-outils. En séparant la tête de fraisage en deux zones planétaires, on peut ainsi obtenir des porte-outils essentiellement plus légers et des puissances d'ensemble plus petites pour l'entraînement de la machine. Mais d'autre part, il faut alors accepter de voir se réduire la vitesse de creusement théoriquement accessible. D'après la formule (12), à conditions de coupe identiques et rapport $\frac{a_r}{r_{ts}}$ constant, la vitesse de creusement ne dépend que du rapport $\frac{z_t}{r_k}$. Dans le cas de plusieurs zones planétaires à même nombre z_t de porte-outils, la zone externe agit toujours de façon limitée sur la vitesse de creusement ; car, dans cette zone, lorsque la vitesse de rotation de la tête de fraisage augmente et que la vitesse de rotation des porte-outils est fixée (vitesse de coupe), le maximum admissible est atteint plus tôt pour la profondeur de pénétration. Les vitesses de creusement, théoriquement réalisables par les têtes de fraisage à une et à deux zones planétaires (Figure 42), seraient donc dans le rapport 3 : 2.

Il existe plusieurs raisons qui militent en faveur d'un chevauchement entre les zones planétaires extérieure et intérieure, de manière que les porte-outils de la zone intérieure travaillent au-delà de leur zone d'attaque de 180°, mais que la zone d'attaque des porte-outils extérieurs soit réduite (cfr. la Figure 43 B). A cause de la plus faible distance r_k entre centre du porte-outils extérieur et centre de la tête de fraisage, on peut escompter une vitesse de creusement un peu plus élevée que dans le cas de la tête de fraisage à deux zones planétaires, représentée sur la figure 42.

En outre, en l'absence d'un chevauchement entre zones planétaires, les porte-outils extérieurs et intérieurs (Figure 42) abattent des volumes de débris très différents et absorbent ainsi des puissances très différentes. Si, par exemple, les porte-outils

.../...

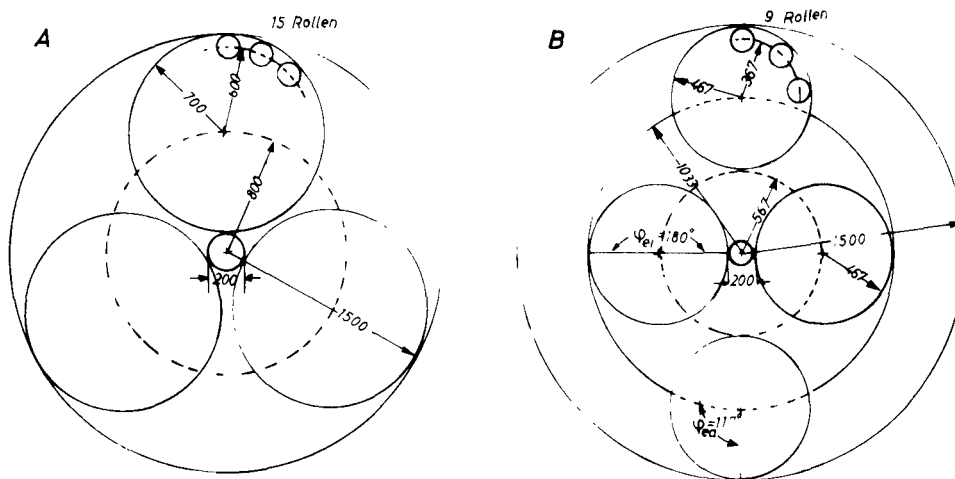


Figure 43 : Formes de tête de fraisage pour l'exemple de calcul d'après le tableau 1
Dimensions en mm.

extérieurs et intérieurs doivent travailler avec la même profondeur maximale de pénétration, la vitesse de rotation des porte-outils intérieurs peut descendre à un tiers de celle à l'extérieur ; il en va de même pour la puissance d'entraînement. Par le chevauchement entre zones planétaires extérieure et intérieure, ces fortes différences de puissance peuvent être atténuées ; de même, l'usure des molettes dans les zones extérieure et intérieure peut s'uniformiser. Enfin, le chevauchement entre zones pourrait procurer un autre avantage par le fait qu'il est maintenant possible de réduire légèrement le couple de la tête de fraisage en faisant tourner en sens contraire les porte-outils extérieurs et la tête de fraisage.

Le tableau 1 compare les deux types de tête de fraisage en question : à une zone planétaire et trois porte-outils (A) et à deux zones planétaires et quatre porte-outils (B). La Figure 43 renseigne les dimensions intervenant dans le calcul. La limite

.../...

		Tête de fraisage à une zone planétaire et trois porte-outils (Figure 43 A)		Tête de fraisage à deux zones planétaires et quatre porte-outils (Figure 43 B)	
		a) Largeur d'enlevure 50 mm	b) Largeur d'enlevure 30 mm	Largeur d'enlevure 50 mm	
Porte-outils	Nombre de tours $n_t \text{ [min}^{-1}\text{]}$	20,5	20,5	Porte-outils intérieur 16,8	Porte-outils extérieur 30,6
	Couple $M_t \text{ [kgm]}$	1980	1950	730	545
	Puissance d'entraînement $P_t \text{ [kW]}$	41,6	40	12,6	17,2
Tête de fraisage	Nombre de tours $n_k \text{ [min}^{-1}\text{]}$	0,42	0,6	0,296	
	Couple $M_k \text{ [kgm]}$	64.500	41.200	Rotation des porte-outils extérieurs par rapport à celle de la tête de fraisage de même sens 45.100	de sens contraire 43.100
	Puissance d'entraînement $P_k \text{ [kW]}$	27,8	25,4	13,8	13,1
Machine	Puissance d'entraînement de la machine $P_m \text{ [kW]}$	153	145	Rotation dans le même sens de la tête de fraisage et des porte-outils extérieurs 73	
	Effort de poussée $F_v \text{ [T]}$	106	123	73	
	Vitesse de creusement $V_b \text{ [m/h]}$	3,8	3,24	1,78	
	Consommation spécifique d'énergie $W_{\text{spez}} \text{ [kWh/m}^3\text{]}$	5,7	6,35	5,9	

Tableau 1 : Caractéristiques de deux têtes de fraisage à porte-outils en mouvement de rotation planétaire.

Dimensions d'après la Figure 43

Vitesse de coupe : 1,5 m/s

Charge maximale sur les molettes coupantes : 9 tonnes

supérieure fut fixée de nouveau à 1,5 m/s pour la vitesse de coupe et à 9 tonnes pour la charge par molette. La largeur d'enlevure est supposée égale à 50 mm. Pour la tête coupante A, on adopte, en outre, la largeur d'enlevure de 30 mm, afin d'élucider les influences exercées du point de vue technique de la machine.

En portant de trois à quatre le nombre de porte-outils que l'on répartit, comme expliqué, en deux zones planétaires sur la tête de fraisage, le couple et la puissance d'entraînement des porte-outils peuvent être réduits à moins de la moitié. Etant donné la part importante absorbée par les porte-outils, la puissance totale d'entraînement de la machine reste donc elle aussi notablement plus faible. Le couple d'une tête de fraisage à deux zones planétaires est, grosso modo, inférieur d'un tiers. Cependant, la rotation en sens contraire des porte-outils extérieurs ne peut abaisser le couple de la tête de fraisage que dans une mesure très faible, pratiquement négligeable. L'effort de poussée est, lui aussi, plus faible pour une tête de fraisage à deux zones planétaires. Ainsi, à conditions de coupe et à charges de molettes égales, tous les efforts, moments et puissances d'entraînement à fournir à la tête de fraisage sont plus faibles dans le cas de la tête de fraisage à deux zones planétaires.

Par ailleurs, la tête de fraisage à trois porte-outils et à une zone planétaire peut cependant réaliser une vitesse de creusement nettement plus élevée, et dans des conditions telles que la consommation spécifique d'énergie se réduit, ne fût-ce que d'une quantité négligeable. L'importance du couple de cette tête de fraisage peut être considérée comme particulièrement gênante. Cependant, ce couple peut être considérablement abaissé par l'adoption d'une largeur d'enlevure plus faible, sans nuire sérieusement aux autres caractéristiques. Le couple atteint alors un ordre de grandeur parfaitement réalisé sur les machines actuelles pour roche dure.

.../....

4.3 Comparaison résumée des différentes formes de tête de fraisage

Le tableau 2 compare la tête de fraisage à trois porte-outils en mouvement de rotation planétaire et la tête de fraisage à trajectoires de coupe concentriques et profil en W. Le couple de la tête de fraisage à profil en W est nettement plus petit ; par contre, son effort de poussée est significativement plus élevé. Puissance d'entraînement, vitesse de creusement et consommation spécifique d'énergie ne se différencient que dans une mesure négligeable.

Par comparaison avec une tête de fraisage plane classique, on observe que le couple et la puissance d'entraînement sont à peine différents. Cependant, l'effort de poussée est sensiblement plus élevé pour la tête de fraisage plane. Le plus surprenant cependant, c'est le fait que la vitesse de creusement soit radicalement plus faible pour la tête de fraisage plane, avec une consommation spécifique d'énergie relevée en proportion.

La comparaison résumée des trois types de tête de fraisage montre que l'attaque améliorée de la roche en mettant à profit la présence d'une face libre, tant avec une tête de fraisage "planétaire" qu'avec une à trajectoires de coupe concentriques, réduit sensiblement la consommation spécifique d'énergie ; c'est là certainement un indice important d'une meilleure attaque de la roche. Cependant, l'importance de cette seule consommation ne doit pas être surestimée. Dans le creusement mécanique des galeries, l'intervention des frais d'énergie dans l'ensemble des frais est très faible dans tous les cas. En outre, l'installation d'unités motrices de grande puissance ne suscite aucun problème techniquement insurmontable. Dans la conception et le dimensionnement des pièces principales et finalement de toute la machine, les efforts et les moments à fournir sont bien plus déterminants. A ce propos intervient une différence essentielle entre la tête de fraisage

.../...

	L'action d'une surface libre est mise à profit		Pas de surface libre en présence
	Porte-outils en mouvement de rotation planétaire	Trajectoires de coupe concentriques	
	Trois porte-outils (Fig. 43A et tableau 1)	Profil en W (Figure 35)	Tête de fraisage plane (Figure 35)
Couple de la tête de fraisage M_k [kgm]	64.500	18.000	16.200
Puissance d'entraînement de la machine P_m [kW]	153	175	158
Effort de poussée F_v [T]	106	225	270
Vitesse de creusement v_b [m/h]	3,8	3,9	2,3
Consommation spécifi- que d'énergie $W_{spéc}$ [kWh/m ³]	5,7	6,3	9,8

Tableau 2 : Caractéristiques des machines dans le cas de formes de tête de fraisage à attaque de roche différente

Diamètre de creusement : 3 m

Largeur d'enlevure : 50 mm

Vitesse maximale de coupe : 1,5 m/s

Charge maximale sur les molettes : 9 tonnes

à trajectoires concentriques et la "planétaire" : il faut surtout développer, avec la première, des efforts de poussée élevés ; avec la seconde, des couples élevés. Cependant, dans les deux cas, avec les conditions de coupe choisies pour les exemplés, les efforts et moments agissant sur la machine sont grands. Ils amènent inévitablement à construire lourdement la machine, à la manière des machines actuelles pour roche dure, en la dotant de dispositifs étançonneurs qui dévient sûrement vers le massif les efforts et les moments rencontrés. Cela vaut pour la tête de fraisage "planétaire" comme pour la tête à profil en W. La disposition planétaire des porte-outils ne peut donc en aucun cas rendre la machine plus légère, meilleur marché et plus maniable. Les recherches expérimentales l'ont montré : les avantages de l'attaque plus favorable de la roche ne sont utilisés à fond que si l'on travaille avec des profondeurs de pénétration les plus grandes possible et des largeurs d'enlevure pas trop faibles. Il n'est donc pas raisonnable, par le choix de conditions de coupe qui font appel à des efforts plus faibles (par exemple, une petite profondeur de pénétration), de vouloir échapper à la lourdeur de la construction des machines pour roche dure. L'avantage d'une attaque plus favorable de la roche doit plutôt être découvert dans le fait de pouvoir atteindre, en construisant lourdement la machine, des rendements au creusement notablement plus élevés qu'auparavant.

5. Conclusion

Les exemples numériques et les considérations présentés en relation avec la structure de la tête de fraisage, ont servi notamment à démontrer qu'une machine de traçage doit satisfaire à différentes exigences et que, selon l'importance relative accordée à chacune, l'une ou l'autre forme de tête de fraisage acquiert plus d'intérêt. On ne peut donc préciser une disposition optimale universelle à donner à la machine. Cependant, on a exposé une méthode qui permet, à partir des mesures à chaque porte-outils, d'obtenir par calcul les caractéristiques intéressantes pour une machine de traçage. La décision de construire des machines doit finalement venir des constructeurs : ils disposent désormais d'une base de travail, à savoir les valeurs des efforts de coupe obtenues, permettant de mieux résoudre, par le calcul, des problèmes pour lesquels on ne pouvait jusqu'à présent recourir qu'à l'expérience.

Les recherches ont montré que, lors du fraisage efficace de roches dures abrasives, il faut inévitablement développer des efforts élevés à l'arête coupante des taillants à molettes. Cela vaut pour la disposition usuelle, dans un plan, des molettes coupantes comme pour le fraisage bénéficiant d'une surface libre.

Les expériences récoltées lors de la création de molettes appropriées aux essais ont en outre apporté la conviction que les arêtes coupantes sur les taillants à molettes usuels d'aujourd'hui ne sont pas en état de supporter suffisamment les charges élevées que l'on recherche. Actuellement, on élude fréquemment le problème en travaillant dans des conditions défavorables du point de vue technique de fragmentation, c'est-à-dire avec des profondeurs de pénétration et des efforts de coupe faibles.

Dans le cas de l'attaque de roche améliorée, en présence d'une face libre, il est un élément encore plus important que dans le cas de l'attaque classique de la roche par des molettes disposées

.../...

dans un plan : : on peut maîtriser avec sûreté des efforts élevés de coupe à l'arête coupante ; or, c'est à cette seule condition que l'on parvient à valoriser à fond les avantages du découpage de roche amélioré. Un point clef du travail ultérieur de recherche et de mise au point sera d'augmenter la faculté de charge des outils de creusement. Différents matériaux, mises en forme et procédés de découpage doivent être étudiés du point de vue de leur aptitude à construire une arête coupante hautement sollicitable. Si on parvient de cette manière à accroître la durée de vie du taillant à molettes, on aura ouvert la voie à un accroissement notable des rendements dans le creusement mécanisé des galeries, des fendues et des tunnels en roches dures abrasives.

Littérature

1. BARON, L.I., ZAGORSKIJ, LOGUNCOV : Découpe des roches au moyen de molettes coupantes en rotation libre. Sachtnoe stroitelstvo 7 (1963), H. 1, P. 8 - 12
2. BELUGOU, P. et VALANTIN, A. : Recherche sur les pics de machines d'abattage. Centre d'études et de Recherches des Charbonnages de France, Octobre 1963.
3. DERKAC, K.F., ANGELOV, KRAPIVIN : Etude sur le mode de travail des pics de molettes à disques d'une machine de traçage en roche moyennement dure. Sachtnoe stroitelstvo 11 (1967), H. 12, P. 9 - 12
4. DORSTEWITZ, G. et HENDRIKS, H. : Etudes sur le choix d'un outil de découpe favorable du point de vue technique de fragmentation pour le creusement de galeries et de sondages à grand diamètre en roche abrasive compacte. Glückauf-Forschungshefte 29 (1968), H. 2, P. 75 - 86
5. GOODRICH, R.H. : Machines de forage à haute pression. 2ème Symposium annuel sur la recherche minière. Bull. University of Missouri. Technical Series 1957 Nr. 94, P. 25
6. GRAF, K., HENNING, STANGE : Formules et tableaux de la statistique mathématique. Editions Springer Berlin, Heidelberg, New York 1966
7. HEINHOLD, J. et GAEDE, K.W. : Statistique de l'ingénieur Edition R. Oldenbourg, Munich-Vienne 1964
8. McAULIFFE, J.D. : Essai d'une machine à creuser les tunnels, de 2,10 m de diamètre. Mining Congress Journal, Juin 1965, P. 49 - 55

.../...

9. ROBBINS, J.S. et
ANDERSON, D.L. : Tunnels et montages creusés mé-
caniquement : application à l'exploit-
ation souterraine.
Mining Engineering, juillet 1967,
P. 156 - 160
10. N.N. : Techniques de mesure par allongement-
Emploi de jauges de contrainte.
Hartmann & Braun AG., Informations
techniques
EO / D6 : 2.05
-

A n n e x e s

- 1 Etudes de la résistance et analyse minéralogique des roches d'essai
 - 1.1 Grès de la Ruhr, Schiste quartzitique, Grès bigarré
 - 1.2 Granit
- 2 Efforts de coupe à différentes vitesses de coupe
 - 2.1 Vitesses de coupe de 7,5 à 30 m/min
 - 2.2 Vitesses de coupe de 30 à 60 m/min
- 3 Efforts de coupe pour différentes courbures de trajectoire de coupe
- 4 Efforts de coupe des différents taillants d'essai à molettes
- 5 Efforts de coupe lors du fraisage en présence d'une face libre
 - 5.1 Grès bigarré
 - 5.11/3 Largeurs d'enlevure de 20, 40, 60 mm
 - 5.2 Schiste quartzitique
Largeur d'enlevure de 30 mm
 - 5.3 Grès de la Ruhr
 - 5.31/3 Largeurs d'enlevure de 20, 30 40 mm
 - 5.4 Granit
 - 5.41/4 Largeurs d'enlevure de 20, 30, 40, 50 mm
- 6 Efforts de coupe lors du fraisage avec molettes coupantes étagées
 - 6.1 Grès bigarré
 - 6.11 Largeur d'enlevure 20 mm Hauteur du redent 30 m
 - 6.12 Largeur d'enlevure 40 mm
 - 6.121/2 Hauteurs de redent 40, 70 mm
 - 6.13 Largeur d'enlevure 60 mm
 - 6.131/2 Hauteurs de redent 40,60 mm
 - 6.2 Schiste quartzitique
 - 6.21 Largeur d'enlevure 30 mm
 - 6.211/5 Hauteurs de redent 20, 30, 40, 50, 70 mm
 - 6.22 Largeur d'enlevure 50 mm Hauteur de redent 50 mm
 - 6.3 Grès de la Ruhr
 - 6.31 Largeur d'enlevure 30 mm
 - 6.311/3 Hauteurs de redent 30, 40, 50 mm
 - 6.32 Largeur d'enlevure 40 mm
 - 6.321/4 Hauteurs de redent 10, 20, 30, 40 mm

- 6.33 Largeur d'enlevure 60 mm
- 6.331/5 Hauteurs de redent 10, 20, 30, 40, 50 mm

6.4 Granit

- 6.41 Largeur d'enlevure 20 mm
- 6.411/2 Hauteurs de redent 20, 30 mm
- 6.42 Largeur d'enlevure 30 mm
- 6.421/4 Hauteurs de redent 30, 40, 50, 60 mm
- 6.43 Largeur d'enlevure 40 mm
- 6.431/3 Hauteurs de redent 40, 50, 60 mm

7 Efforts de coupe avec molettes coupantes disposées dans un plan

7.1 Schiste quartzitique

- 7.11/5 Largeurs d'enlevure 20, 30, 40, 50, 60 mm

7.2 Grès de la Ruhr

- 7.21/3 Largeurs d'enlevure 20, 40, 60 mm

8 Efforts de coupe lors de la confection d'une entaille

8.1 Schiste quartzitique

- 8.11 Largeur d'enlevure 40 mm
- 8.111/4 Hauteurs de redent s_1 10, 20, 30, 40 mm
- 8.12 Largeur d'enlevure 60 mm
- 8.121/3 Hauteurs de redent s_1 20, 40, 60 mm

8.2 Grès de la Ruhr

- 8.21 Largeur d'enlevure 40 mm
- 8.211/4 Hauteurs de redent s_1 10, 20, 30, 40 mm

9 Evolution typique de l'effort de coupe dans une roche dure abrasive pour différents modes de sollicitations

9.1 Efforts de coupe pour différents angles de cône

9.2 Effort de pénétration et effort de dégagement interne pour différentes largeurs d'enlevure (angle de cône 45°)

9.3 Efforts de coupe lors de la confection d'une entaille de 30 et de 50 mm de largeur

9.4 Efforts de coupe lors du fraisage en présence d'une face libre

Rapport

J.-Nr. 141-67/PM 28

Objet : Etudes de la résistance et analyses minéralogiques sur échantillons rocheux du banc d'essai de fraisage de l'Université Technique de Clausthal

(Pour la Section Creusement et Abattage)

Exécuté par : le Dr. J. SCHIMAZEK

En collaboration avec : le Dr. H. KNATZ

Trois échantillons rocheux ont été envoyés par Mr. TRÖSKEN, ingénieur. Ces roches sont soumises à des essais de fraisage à l'Université Technique de Clausthal. Pour établir la corrélation entre les données du fraisage et les caractéristiques physiques et minéralogiques de la roche, les études suivantes ont été effectuées :

- 1) Détermination de la résistance à la compression (Tableau 1)
- 2) Détermination de la résistance à la traction (Tableau 2)
- 3) Vibrotest (Tableau 3)
- 4) Analyses minéralogiques quantitatives

Les échantillons avaient les désignations suivantes :

Echantillon 1 : Grès de la Ruhr

Echantillon 2 : Grauwacke

Echantillon 3 : Grès bigarré

Etudes minéralogiques et pétrographiques

Echantillon 1 : Grès de la Rhur

Composition miné- : Quartz, fragments de quartzite et de
ralogique Lydite, Plagioclase, Feldspath alcalin, Séricite à minéraux argileux, carbonate grossièrement cristallin et traces de minéraux lourds.

Structure : Réseau faiblement texturé, relativement homogène. Bonne cristallisation. Liant surtout à base de Séricite argileuse. En outre ciment carbonaté pur et siliceux.

.../...

Secondairement liaison pure quartz - quartz.

Composition minérale quantitative en volume (%) :

Quartz	~ 62
Feldspath	~ 12 - 13
Liant siliceux (+ composants quartzitiques et lyditiques)	~ 5
Liant séricito - argileux	~ 15
Carbonate	~ 5 - 6
Traces	< 1

Echantillon 2 Schiste quartzitique

Composition miné- ralogique	: Quartz, Feldspath, Séricite, Muscovite, Chlorite, Minéraux argileux, Traces de mi- néraux lourds.
Structure	: Réseau nettement texturé, à grains rela- tivement fins, homogène. La texture de la roche est visible suivant l'orientation des micas clairs et du quartz (essai au gypse!). La structure du quartz se caracté- rise par une granularité uniforme. Fréquem- ment liaison pure quartz-quartz, sinon liant de Séricite principalement.

Composition minérale quantitative en volume (%) :

Quartz (et éventuellement aussi Feldspath)	~ 67
Feldspath	~ 3
Micas, Minéraux argileux, Chlorite (en partie à passées ferreuses)	~ 30
Traces	< 1

Echantillon 3 Grès bigarré

Composition miné- ralogique	: Quartz, Quartzite, Plagioclase, Feldspath alcalin, Séricite à minéraux argileux, Chlorite, composants hématitiques et limo- nitiques, Traces de minéraux lourds.
Structure	: Réseau à grains non orientés avec réparti- tion minéralogique relativement homogène. Fortement poreux !

.../...

Annexe 1.1

Fréquemment liaison quartz-quartz pure. Sinon
liant à base de Séricite et d'Hématite-Limonite.

Composition minérale quantitative en volume (%) :

Quartz	~ 61
Matériau quartzitique	~ 4
Minéraux argileux, Séricite (partiellement plus fortement traversée de passées ferreuses)	~ 12 - 13
Feldspaths	~ 12
Particules d'oxyde de fer pur	~ 10 - 11

Résultats des essais : Echantillon 1, Grès

Pourcentage de minéraux abrasifs rapporté
au quartz : 72 % (Vol.)

Résistance moyenne à la
compression : 1576 kg/cm²

Résistance moyenne à la
traction : 113 kg/cm²

Vibrotest : 0,02 ± 0,01 mm

Echantillon 2, Schiste quartzitique

Pourcentage de minéraux abrasif rapporté au
quartz : 69 % (Vol.).

Résistance moyenne à la
compression : 1041 kg/cm²

Résistance moyenne à la
traction : 91 kg/cm²

Vibrotest : 0,24 ± 0,13 mm

Echantillon 3, Grès bigarré

Pourcentage de minéraux abrasifs rapporté
au quartz : 72 % (Vol.).

Résistance moyenne à la
compression : 631 kg/cm²

Résistance moyenne à la
traction : 47 kg/cm²

Vibrotest : 0,09 ± 0,02 mm

Essen, le 1er août 1967
PM/Schi/C.

(s) SCHIMAZEK

(s) KNATZ

Tableau 1 du rapport J.-Nr. 141-67/PM 28

Résistance à la compression (kg/cm²)

Echantillon	Valeurs mesurées		Valeur minimale	Valeur moyenne	Valeur maximale
1	1744	1487	1002	1576	1962
	1592	1766			
	1537	1863			
	1002	1962			
	1082	1729			
2	1122	1100	478	1041	1322
	1247	1265			
	1208	1052			
	1322	478			
	797	821			
3	732	398	398	631	792
	756	792			
	750	398			
	633	564			
	673	613			

Résistance à la traction (kg/cm²)

Echantillon	Valeurs mesurées		Valeur minimale	Valeur moyenne	Valeur maximale
1	118	88	88	113	131
	126	131			
	99	116			
	129	109			
	115	101			
2	102	109	65	91	109
	106	65			
	80	85			
	93				
3	48	46	31	47	59
	49	58			
	49	31			
	51	50			
	39	59			
	45	39			
		43			

Tableau 3 du rapport J.-Nr. 141-67/PM 28

Vibrotest (mm)

Echantillon	Valeurs mesurées		Valeur moyenne	Ecart-type	Coefficient de variation
1	0,01 0,01 0,02 0,04 0,01	0,00 0,02 0,01 0,02 0,01	0,02	$\pm 0,01$	50 %
2	0,32 0,24 0,28 0,25 0,26	0,52 0,20 0,18 0,09 0,03	0,24	$\pm 0,13$	54 %
3	0,13 0,11 0,05 0,07 0,07	0,11 0,08 0,08 0,08 0,11	0,09	$\pm 0,02$	22 %

Dimensions des couteaux : 1,2 x 2,4 mm

Données concernant la résistance et la pétrographie de
la roche granitique d'essai

A. Caractéristique et provenance

Granit rouge à gros grains, provenant de la zone centrale de la brèche volcanique, extrait dans la carrière "Wurmberg" de la "Braunlage Granit und Schotterwerke" Sprl.

B. Essai de résistance à la compression (1)

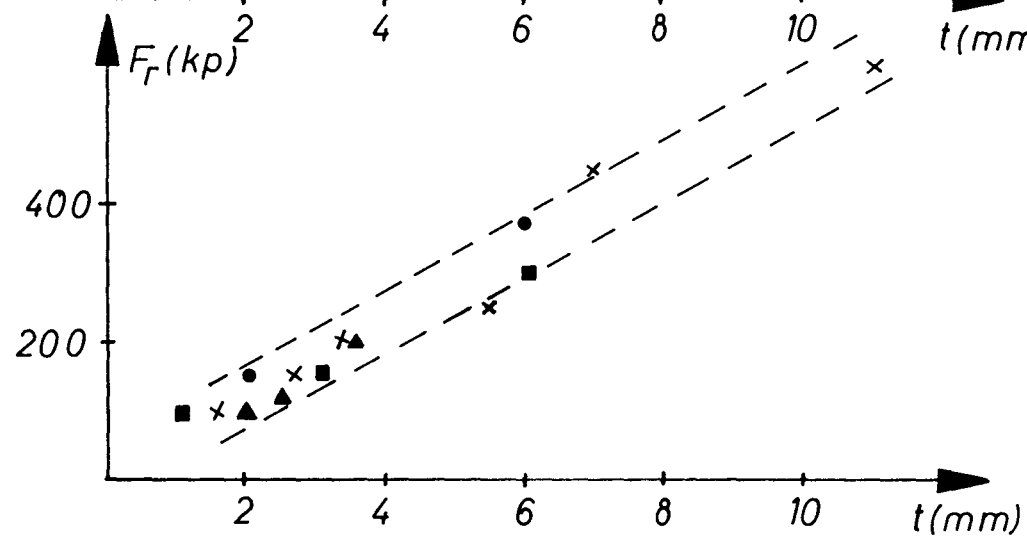
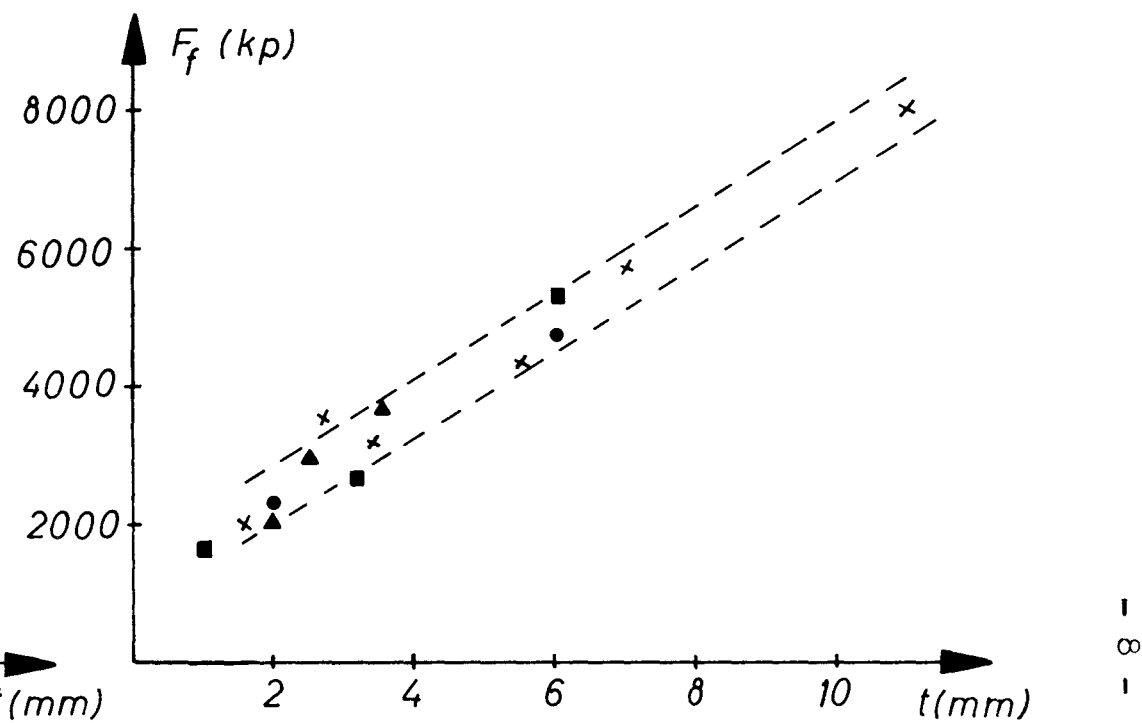
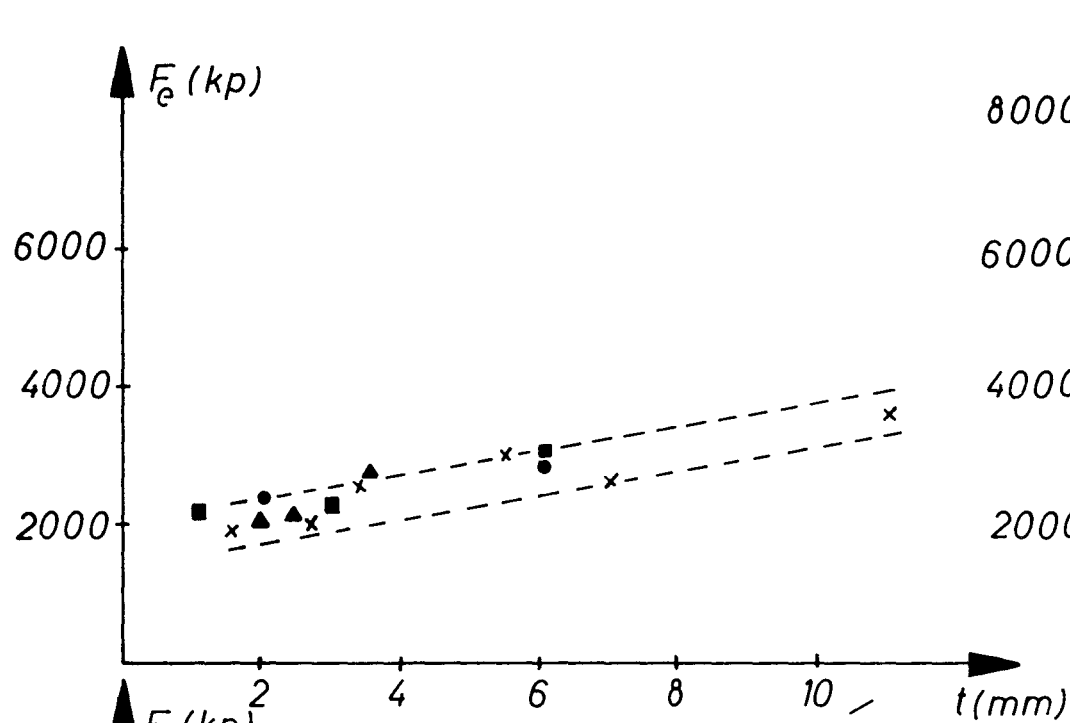
On a mesuré la résistance maximale à la compression d'un cylindre d'essai de 41 mm de diamètre et de longueur. La durée de mise en charge jusqu'à la rupture atteint 2 min. On a obtenu les valeurs suivantes sur 5 cylindres d'essai :

1540 kg/cm ²	
1600 "	
1450 "	Valeur moyenne : 1590 kg/cm ²
1730 "	
1620 "	

C. Composition minéralogique (2)

<u>Minéraux</u>	<u>% (Vol.)</u>	<u>Granulométrie</u>
Feldspath alcalin	40 %	1,8 - 3,2 mm
Quartz	30 %	1 - 1,6 mm
Plagioclase	23 - 24 %	1 - 2,5 mm
Biotite et Chlorite	3 - 4 %	
Traces	2 - 3 %	

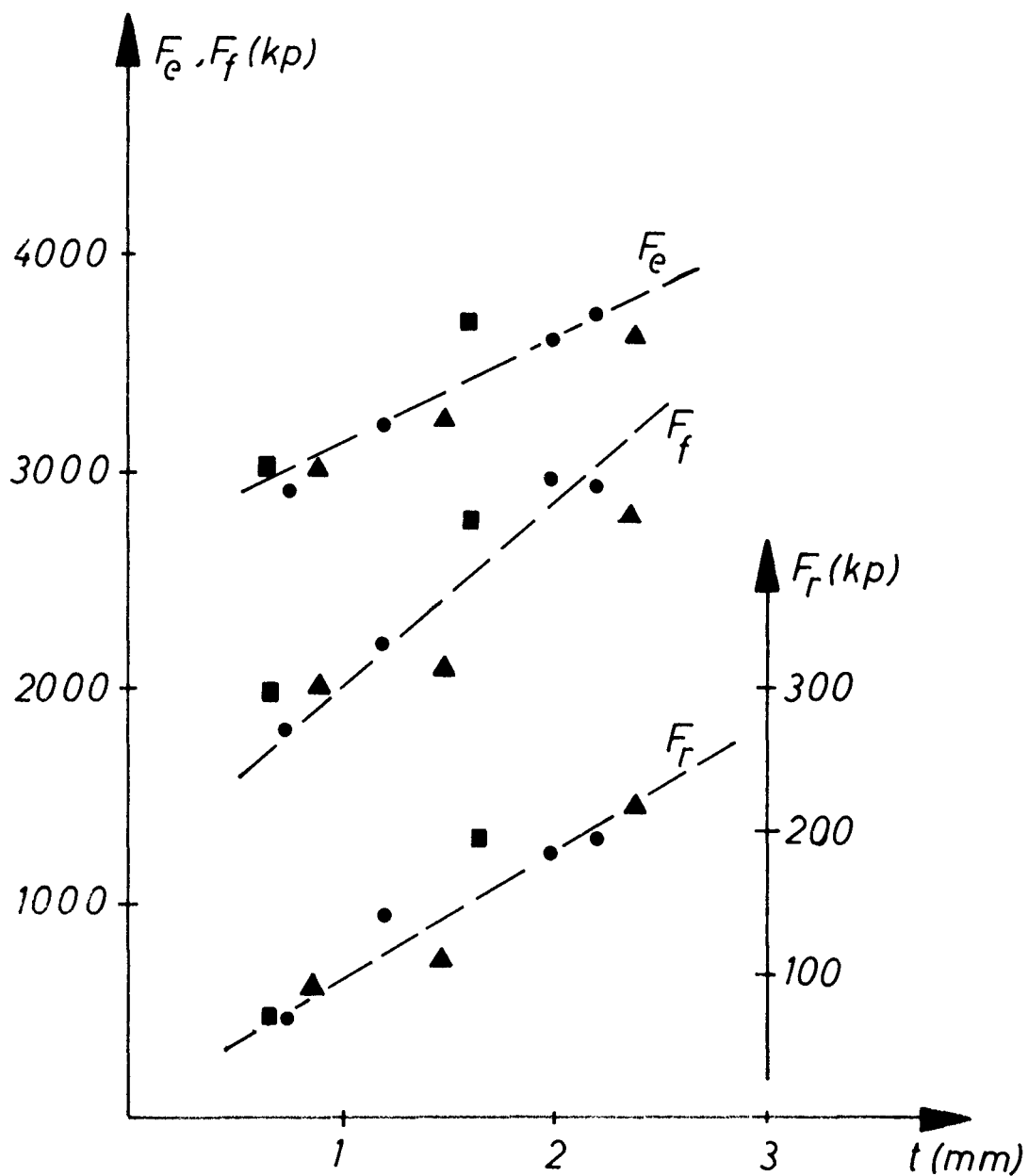
-
- (1) Effectué à l'"Institut für Bergbaukunde und Bergwirtschaftslehre" de l'Université Technique de Clausthal.
- (2) SINGH, D.P. : Etudes pétrographiques et de structure concernant le Granit brechique de Wurmberg et de Königskrug (Harz), Thèse, Clausthal 1960.



Annexe 2.1

Composantes de l'effort de coupe pour des vitesses de coupe comprises entre 7,5 m/min et 30 m/min
Grès de la Ruhr
Largeur d'enlèvement : 20 mm Hauteur de redent: 30 mm

- 7,5 m/min
 - 22,5 m/min
 - ▲ 30 m/min
 - x 15 m/min Mesure de comparaison
 - - - Limites d'erreur moyenne pour les valeurs compensées des mesures comparative
- kp = kg



Annexe 2.2

Composantes de l'effort de coupe pour des vitesses de coupe comprises entre 30 m/min et 60 m/min

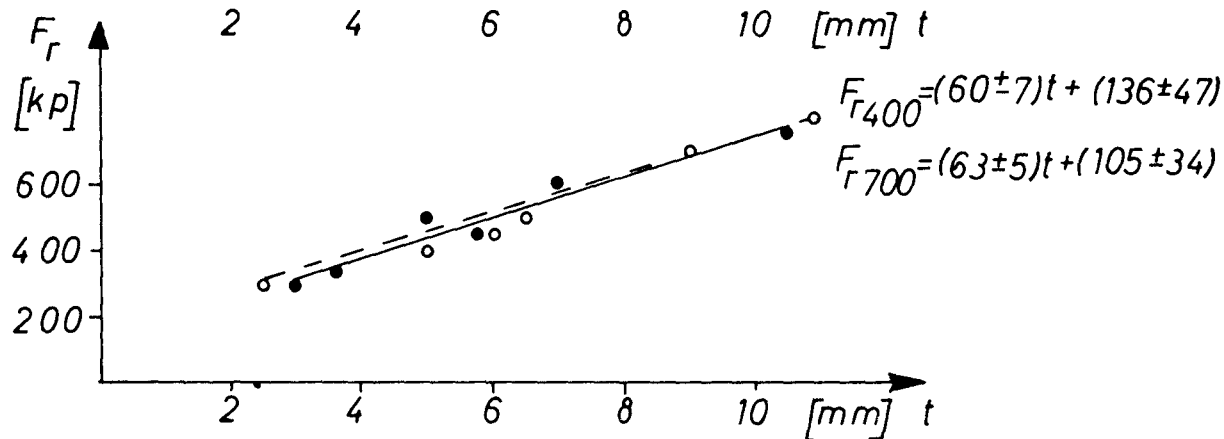
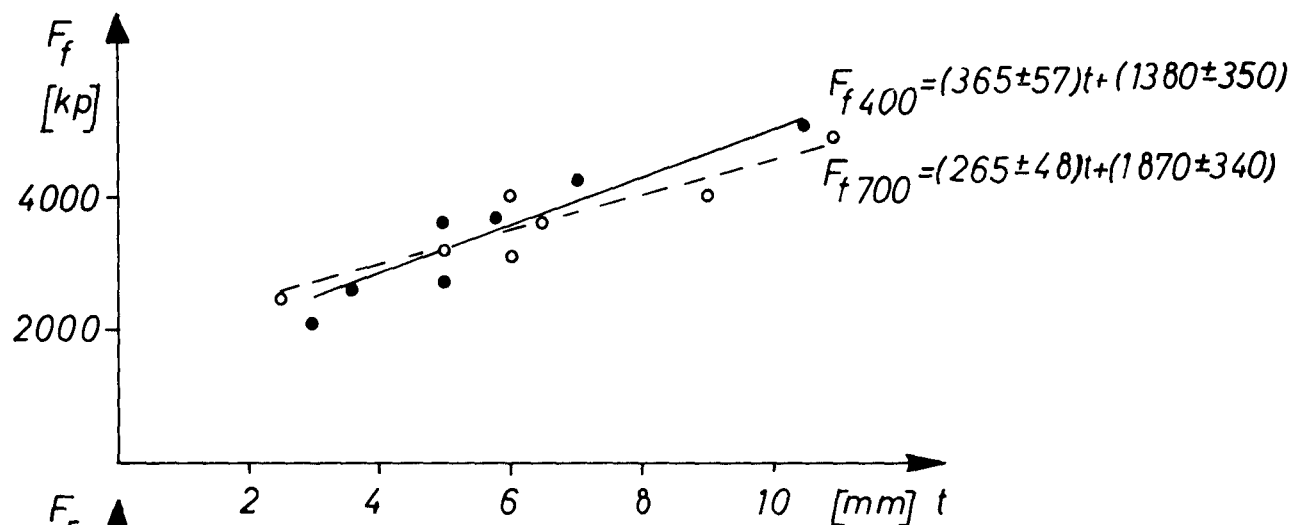
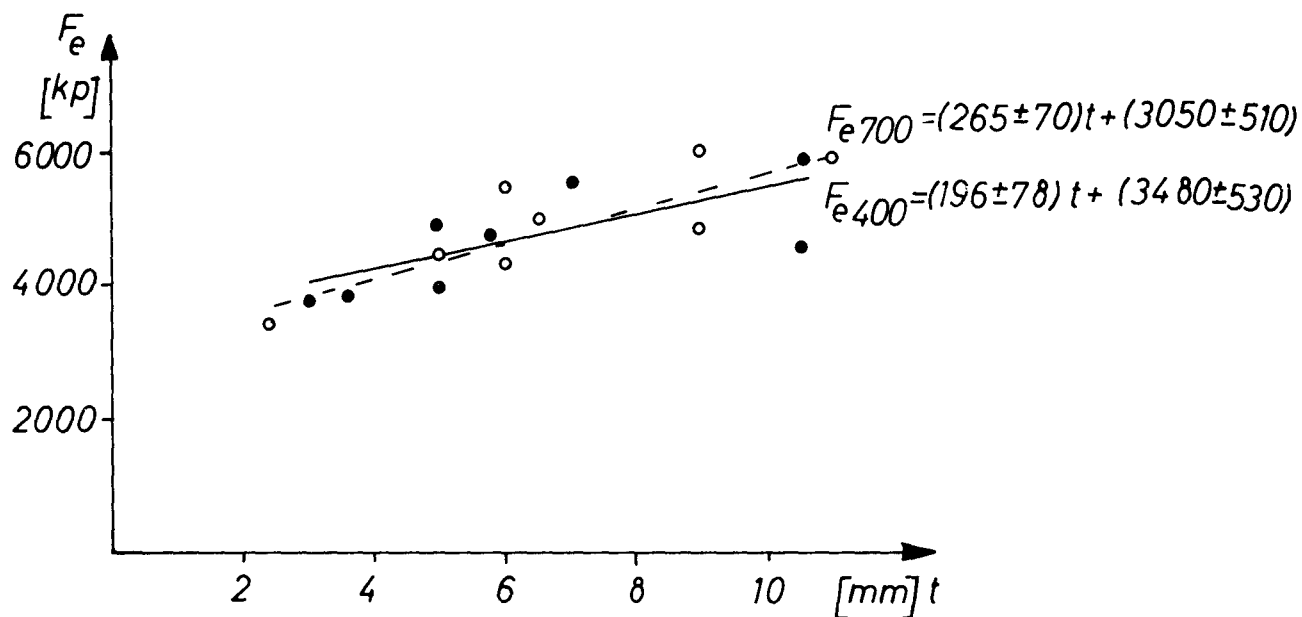
Grès de la Ruhr

Largeur d'enlevure : 30 mm Hauteur de redent : 30 mm

● 30 m/min



▲ 45 m/min

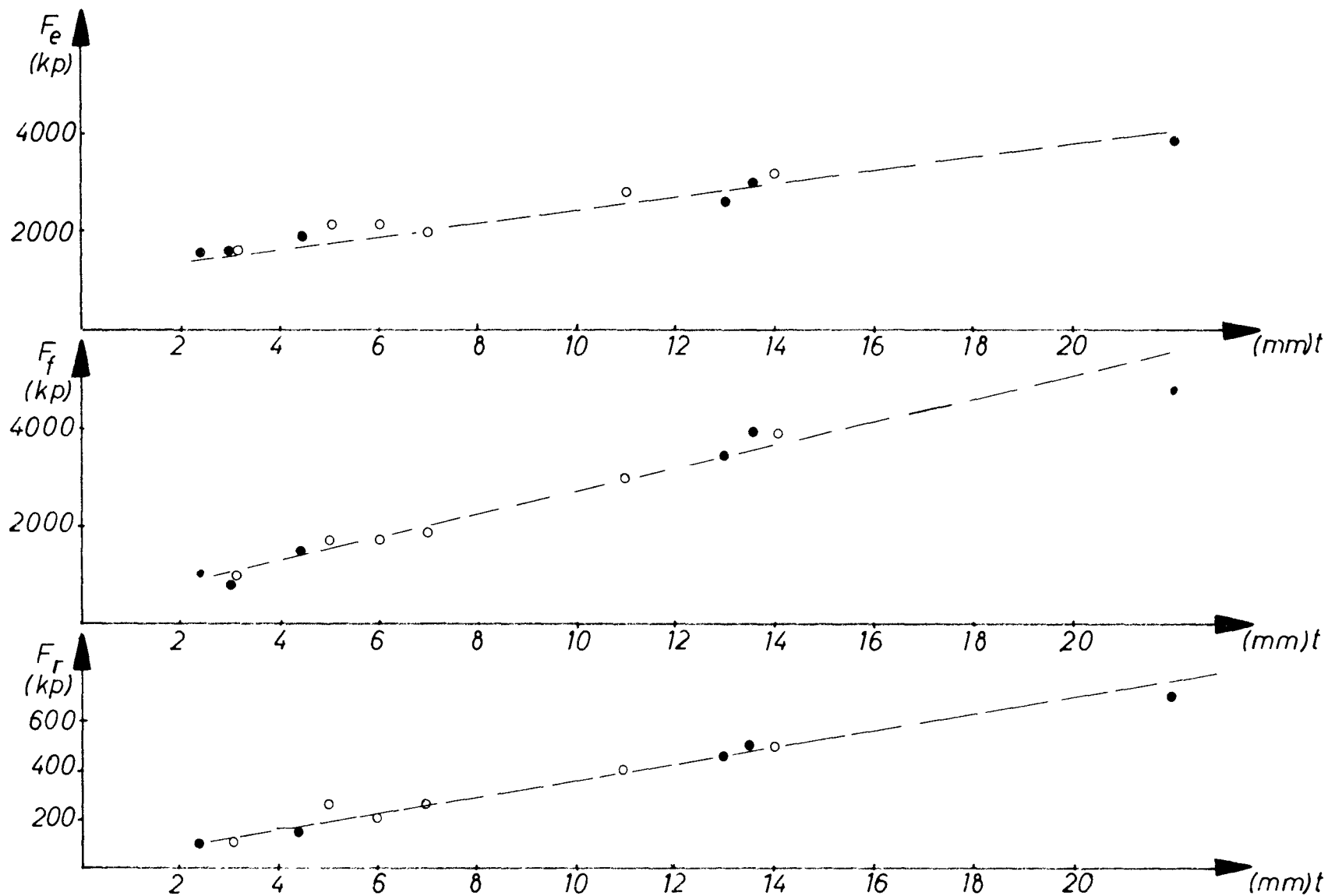
■ 60 m/min



Annexe 3

Composantes de l'effort de coupe pour différentes courbures
 de trajectoire de coupe
 Grès de la Ruhr
 Largeur d'enlèvement : 30 mm Hauteur de redent : 30 mm

- 
 Valeurs de mesure et droites de compensation pour
 un diamètre de trajectoire de coupe de 400 mm
- 
 Valeurs de mesure et droites de compensation pour
 un diamètre de trajectoire de coupe de 700 mm



Annexe 4 : Composantes de l'effort de coupe des différents taillants d'essai à molettes.

Grès bigarré. Largeur d'enlèvement : 40 mm. Hauteur de redent : 40 mm.

- Molette coupante en métal dur (150 mm de diamètre)
- Molette coupante en acier (200 mm de diamètre).

Annexe 5.11

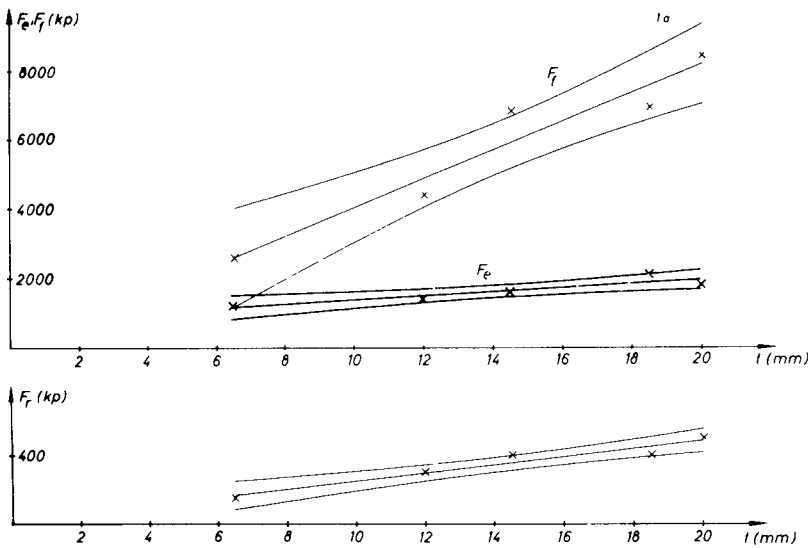
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Fraisage en présence d'une face libre.

Roche : Grès bigarré ; Largeur d'enlevure : 20 mm. Hauteur de redent :-

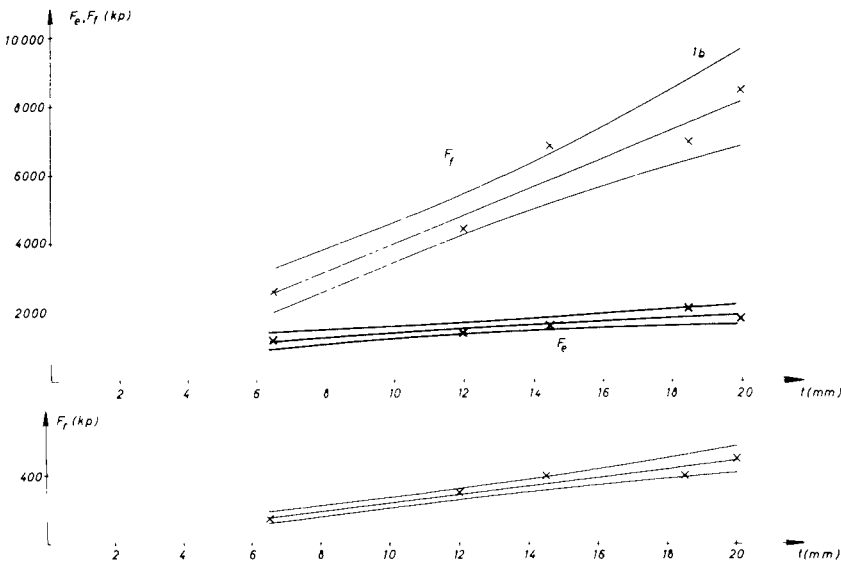
Compensation par droites

$F = a_1 t + a_2$



Compensation par paraboles

$F = t^{a_1} \cdot a_2$



Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a_1'	ma_1'	a_2'	ma_2'	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	58	15	781	240	0,413	0,11	504	140	29,3	32,3	122
F_f	411	65	-59	990	1,02	0,12	379	120	501	504	5293
F_r	23,6	3,7	11	56	1,02	0,12	23	7,1	1,65	1,73	17,5

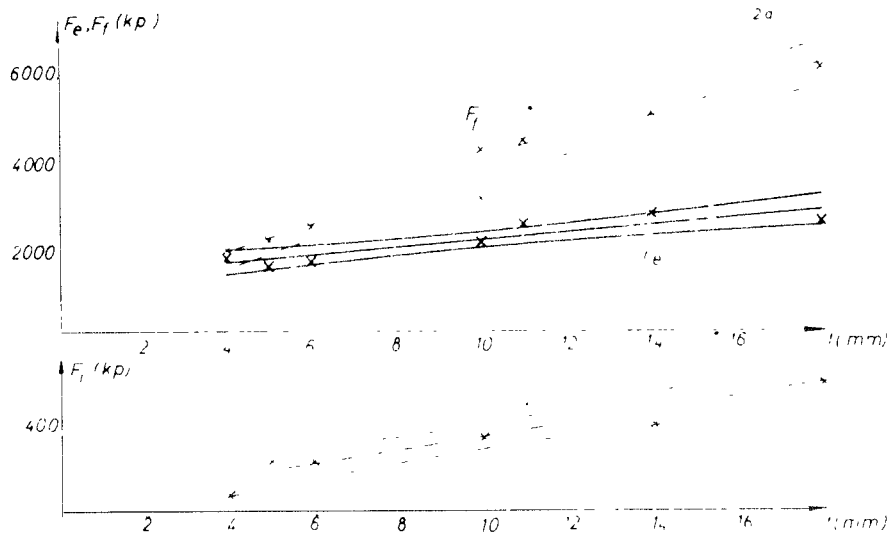
Annexe 5.12

Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

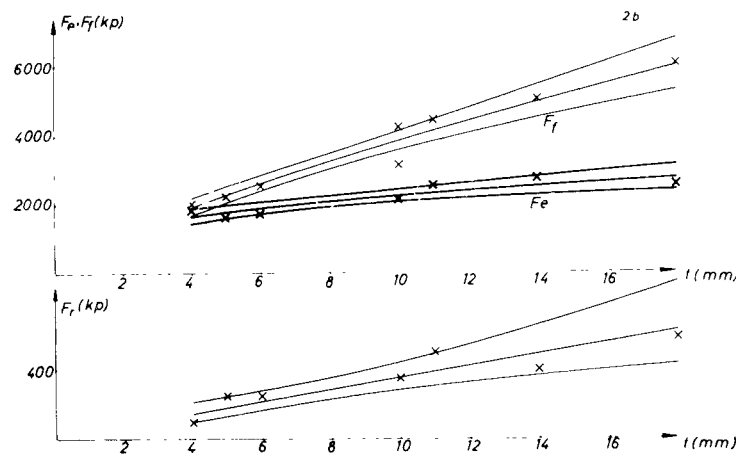
Attaque de la roche : Fraisage en présence d'une face libre.

Roche : Grès bigarré ; Largeur d'enlèvement : 40 mm ; Hauteur de redent :-

Compensation par
droites
 $F = a_1 t + a_2$



Compensation par
paraboles
 $F = t^{a_1} \cdot a_2'$



Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPEN- SATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a_1'	ma_1'	a_2'	ma_2'	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	75	18	1390	190	0,338	0,073	1009	160	53,2	45,5	182
F_f	296	28	780	300	0,759	0,073	661	100	129	130	2093
F_r	29,1	5,8	64	63	0,95	0,2	39,8	17	5,36	5,95	27

Annexe 5.13

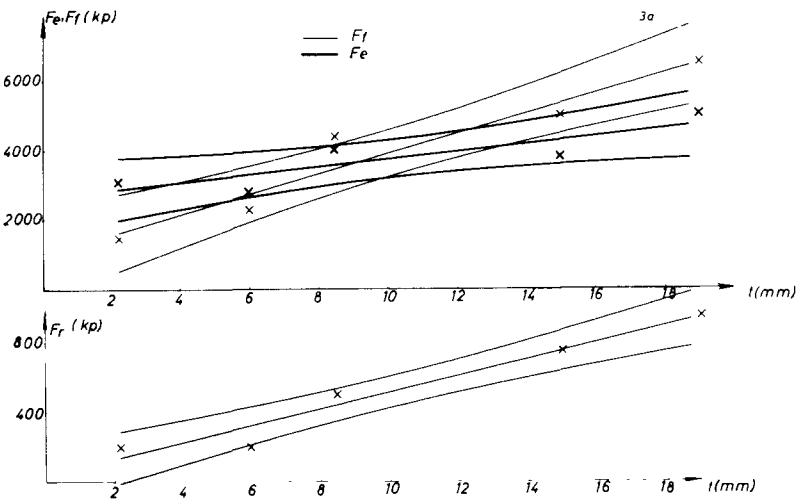
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Fraisage en présence d'une face libre.

Roche : Grès bigarré; Largeur d'enlevure : 60 mm; Hauteur de redent : -

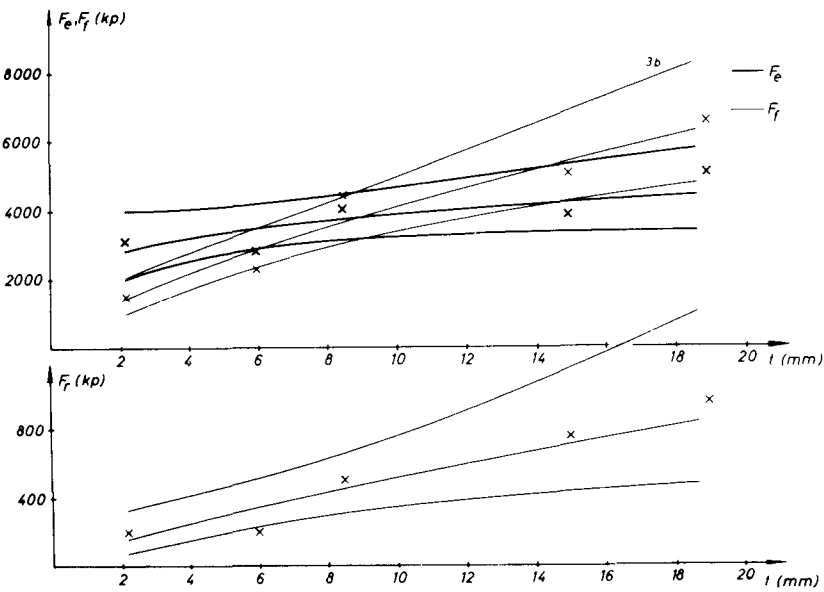
Compensation par
droites

$F = a_1 t + a_2$



Compensation par
paraboles

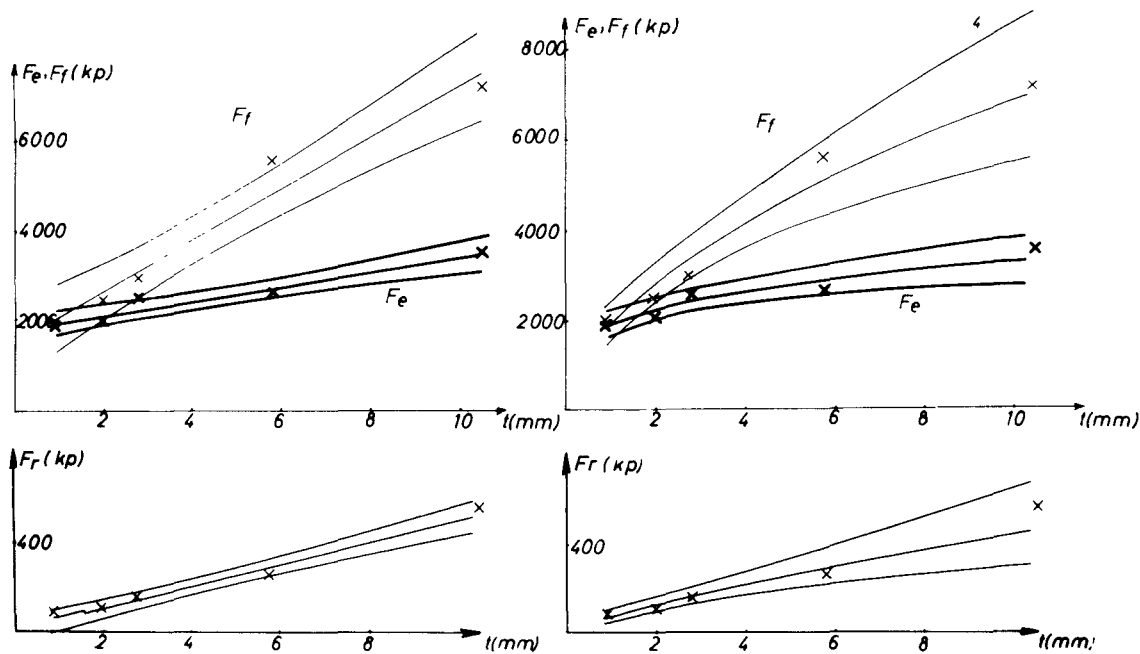
$F = t^{a_1} \cdot a_2$



Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPEN- SATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a_1'	ma_1'	a_2'	ma_2'	LINEAIRE	PARABOL.	
F_e	108	37	2640	440	0,203	0,099	2400	520	263	374	738
F_f	287	46	1020	550	0,68	0,10	832	190	402	360	4133
F_r	47,7	6,2	36	74	0,77	0,20	85	39	7,3	13,1	111

Annexe 5.2

Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %). Attaque de la roche : Fraisage en présence d'une face libre. Roche : Schiste quartzitique. Largeur d'enlèvement : 30 mm. Hauteur de redent : -



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a_1} \cdot a_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a_1'	ma_1'	a_2'	ma_2'	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	159	23	1790	120	0,211	0,048	1840	120	32,1	55,9	405
F_f	568	63	1550	350	0,56	0,067	1890	180	242	186	5008
F_r	49	4,3	9	24	0,79	0,11	70,9	11	1,11	3,75	37

Annexe 5.31

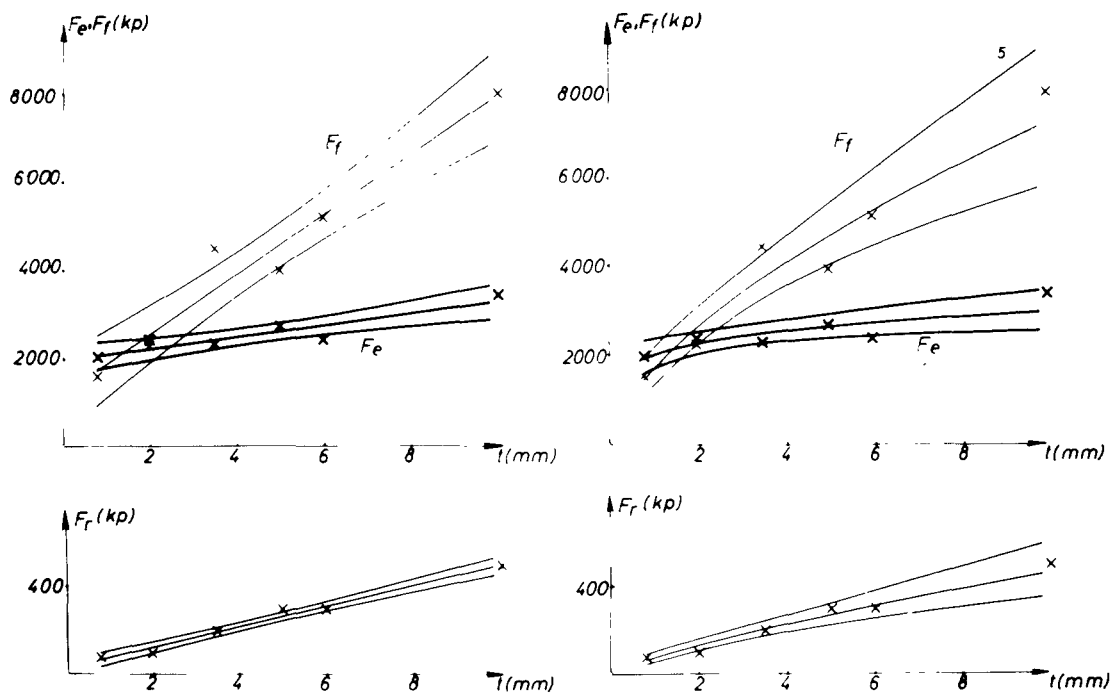
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Fraisage en présence d'une face libre

Roche : Grès de la Ruhr

Largeur d'enlevure : 20 mm

Hauteur de redent : -



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINEAIRE	PARABOL.	
F_e	133	29	1920	160	0,169	0,053	2025	160	47,5	86,2	231
F_f	677	77	1185	420	0,629	0,076	1717	190	324	416	5182
F_r	47,1	3,1	32,1	16	0,764	0,093	79	11	0,52	0,983	24

Annexe 5.32

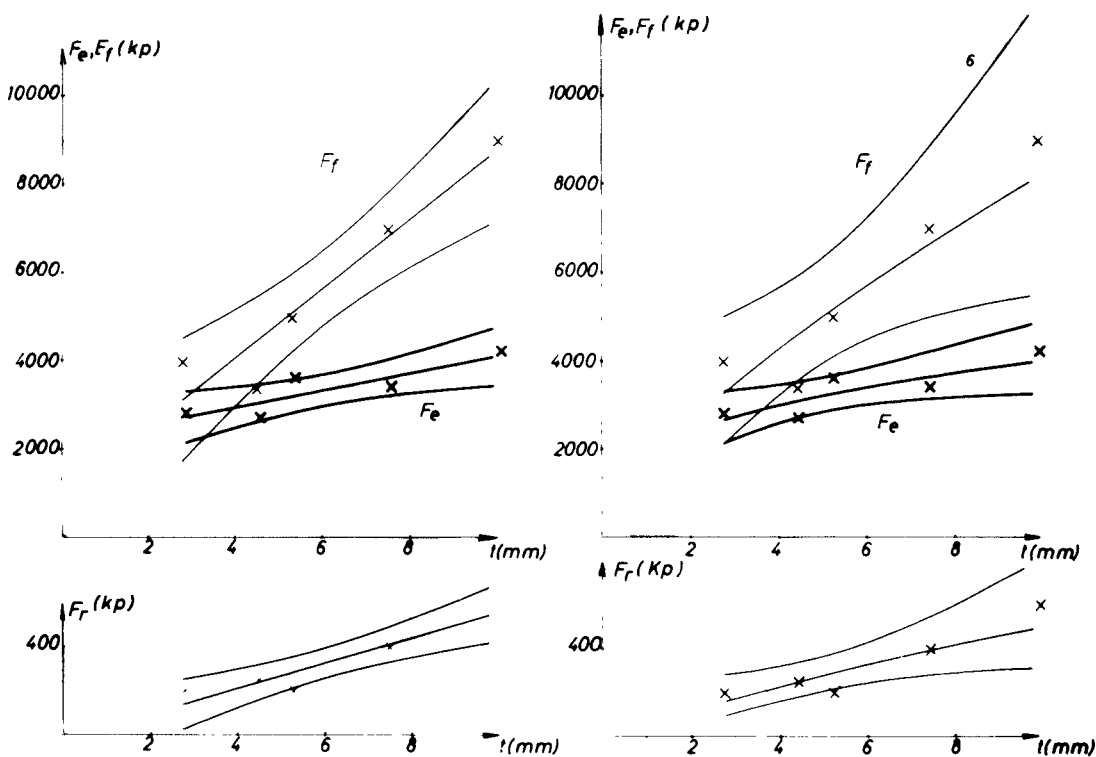
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Fraisage en présence d'une face libre.

Roche : Grès de la Ruhr.

Largeur d'enlevure : 30 mm.

Hauteur de redent : -



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a_1'} \cdot a_2'$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a_1'	ma_1'	a_2'	ma_2'	LINEAIRE	PARABOL.	
F_e	193	60	2170	390	0,31	0,11	1920	390	115	131	378
F_f	785	140	950	940	0,71	0,22	1560	620	658	930	5310
F_r	58	11	-19	76	0,87	0,26	67	31	4,28	6,14	29,3

Annexe 5.33

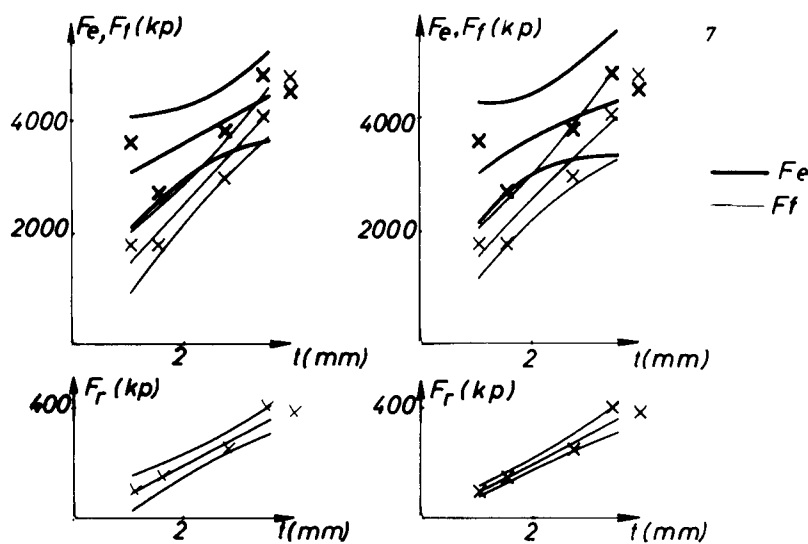
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Fraisage en présence d'une face libre.

Roche : Grès de la Ruhr.

Largeur d'enlevure : 40 mm.

Hauteur de redent : -



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a_1'} \cdot a_2'$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPEN- SATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a_1'	ma_1'	a_2'	ma_2'	LINEAIRE	PARABOL.	
F_e	541	220	2470	630	0,29	0,16	2958	470	310	369	677
F_f	1074	120	306	350	0,79	0,13	1452	180	95,5	142	1819
F_r	105	14	-19	40	1,08	0,092	98,5	8,1	1,23	1,24	17,9

Annexe 5.41

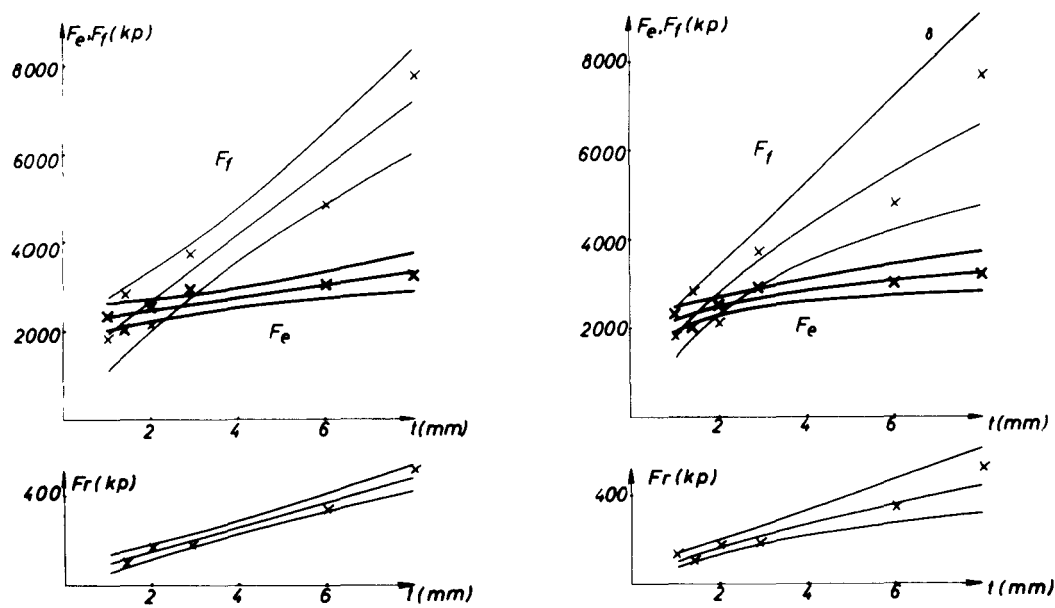
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Fraisage en présence d'une face libre.

Roche : Granit.

Largeur d'enlevure : 20 mm.

Hauteur de redent : -



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	142	39	2140	170	0,19	0,049	2150	130	61,9	44,6	211
F_f	748	100	1150	470	0,62	0,11	1810	250	459	636	4822
F_r	55,8	5,3	41	23	0,71	0,11	99	14	1,15	2,31	26

Annexe 5.42

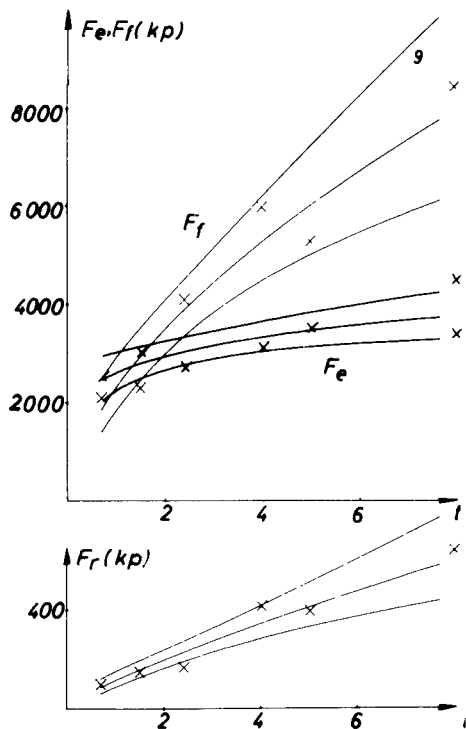
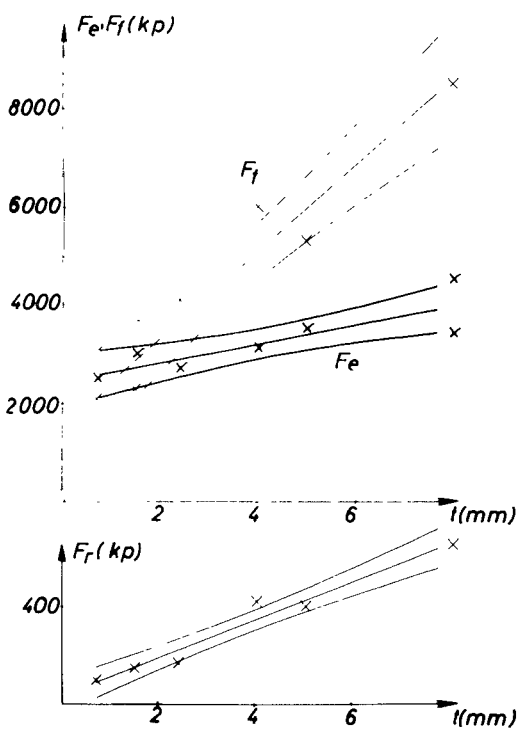
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Fraisage en présence d'une face libre.

Roche : Granit.

Largeur d'enlèvement : 30 mm.

Hauteur de redent : -



Compensation par droites

$F = a_1 t + a_2$

Compensation par paraboles

$F = t^{a_1'} \cdot a_2'$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a_1'	ma_1'	a_2'	ma_2'	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	188	53	2440	260	0,178	0,052	2590	190	149	177	433
F_f	878	110	1550	490	0,601	0,085	2290	250	454	452	5872
F_r	77	7,8	35	34	0,79	0,10	114	14	2,21	2,86	45

Annexe 5.43

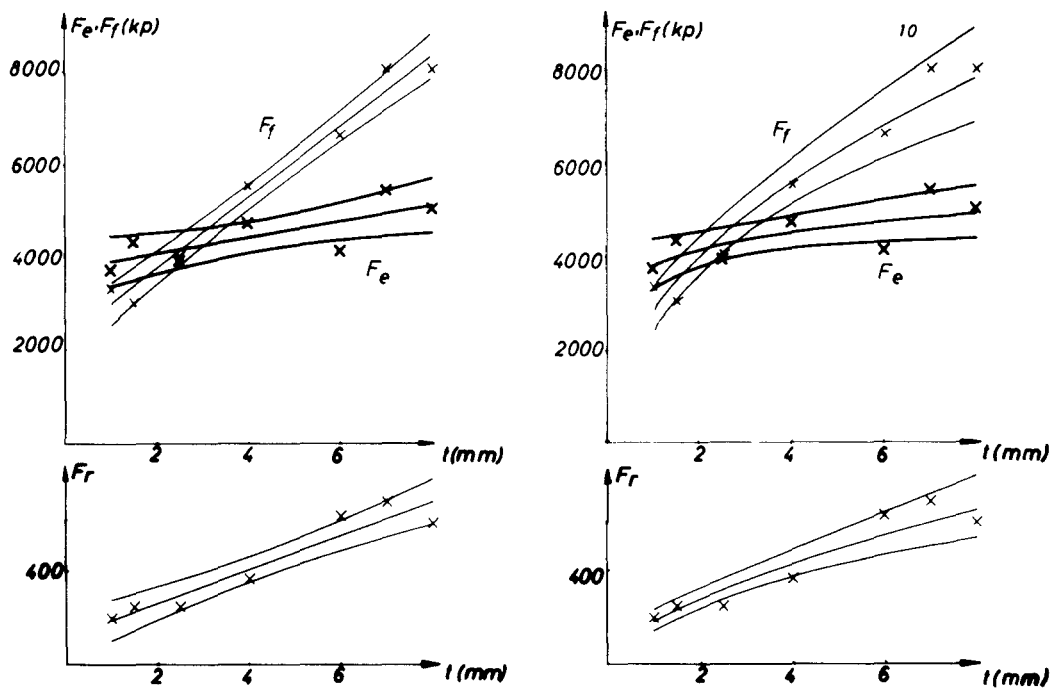
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Fraisage en présence d'une face libre.

Roche : Granit.

Largeur d'enlèvement : 40 mm.

Hauteur de redent : -



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	170	64	3710	320	0,12	0,05	3760	270	189	200	379
F_f	758	52	2230	260	0,494	0,056	2800	220	127	221	4507
F_r	73	10	118	52	0,619	0,086	181	22	5,05	5,63	45

Annexe 5.44

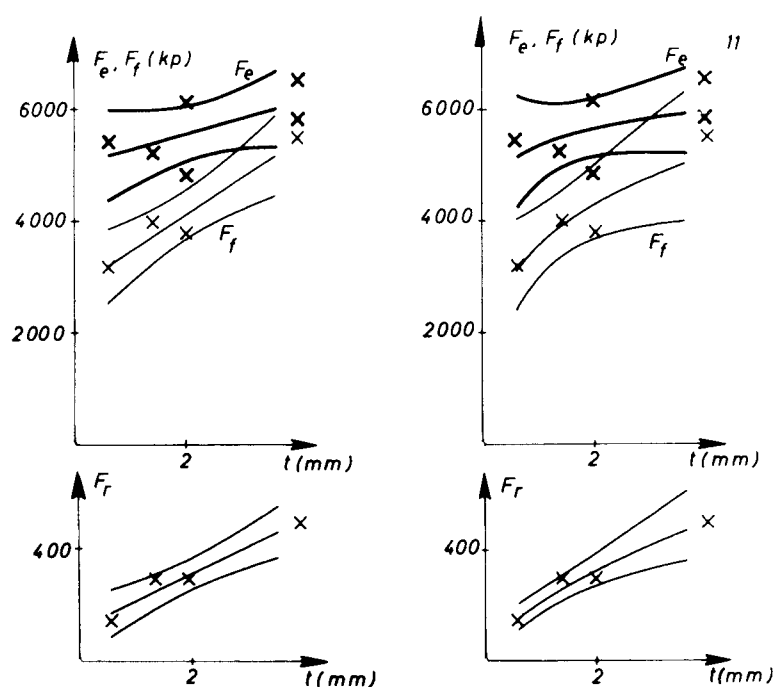
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Fraisage en présence d'une face libre.

Roche : Granit.

Largeur d'enlevure : 50 mm.

Hauteur de redent : -



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

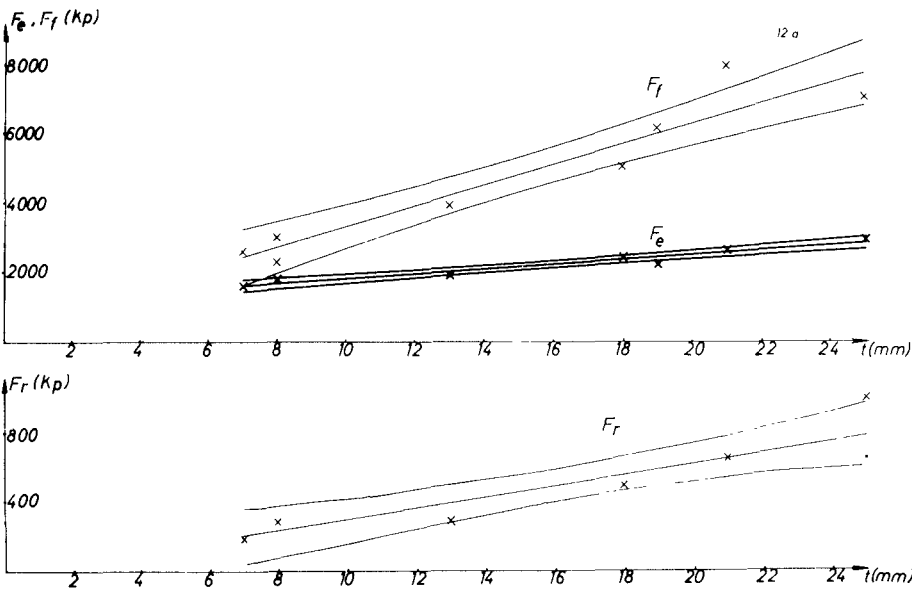
Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	274	170	4990	460	0,078	0,067	5320	330	301	348	387
F_f	651	110	2820	280	0,266	0,073	3560	210	90,8	166	956
F_r	96	15	119	36	0,614	0,084	213	15	1,49	1,06	20,6

Annexe 6.11

Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %). Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées. Roche : Grès bigarré. Largeur d'enlevure : 20 mm. Hauteur de redent: 30 mm

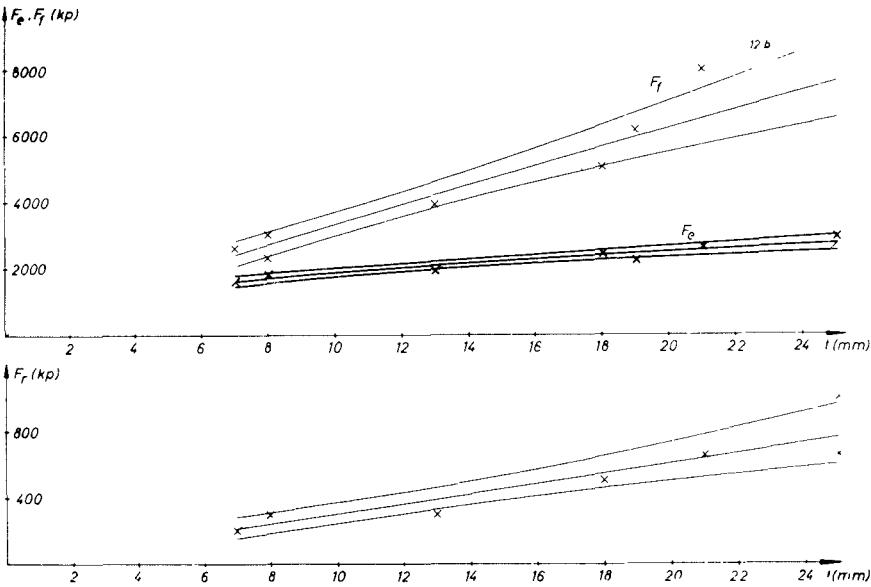
Compensation par droites

$F = a_1 t + a_2$



Compensation par paraboles

$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$



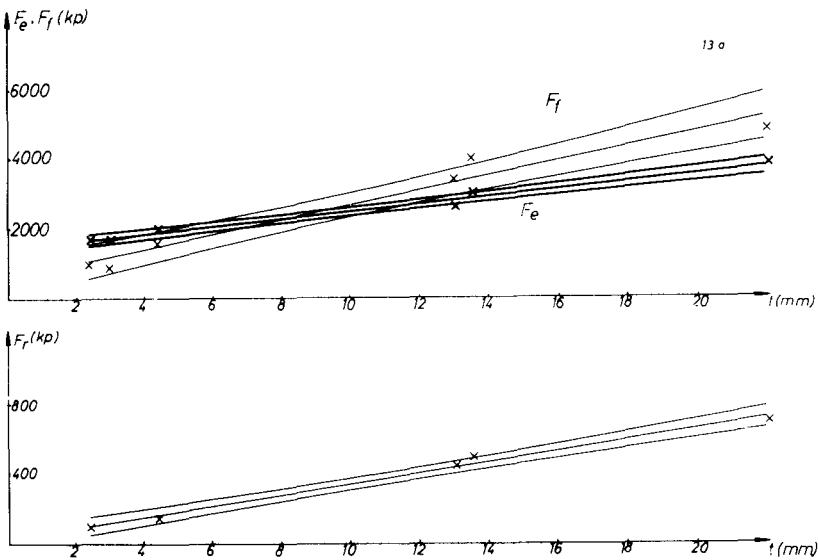
Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINEAIRE	PARABOL.	
F_e	66,7	7,9	1140	130	0,412	0,059	717	110	17,2	26,3	217
F_f	293	40	364	650	0,90	0,10	414	110	530	532	4467
F_r	33,2	6,7	42	120	0,99	0,16	30	13	15,3	16,2	75,5

Annexe 6.121

Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %). Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées. Roche : Grès bigarré. Largeur d'enlevure : 40 mm. Hauteur de redent : 40 mm.

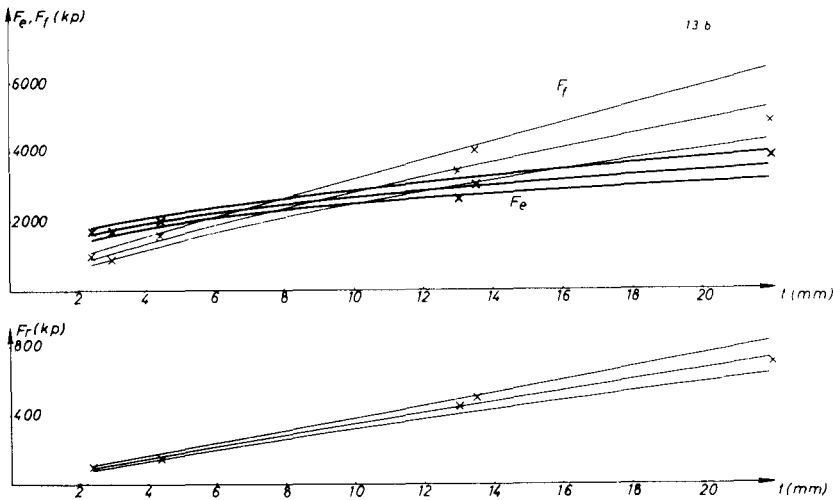
Compensation par droites

$F = a_1 t + a_2$



Compensation par paraboles

$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$



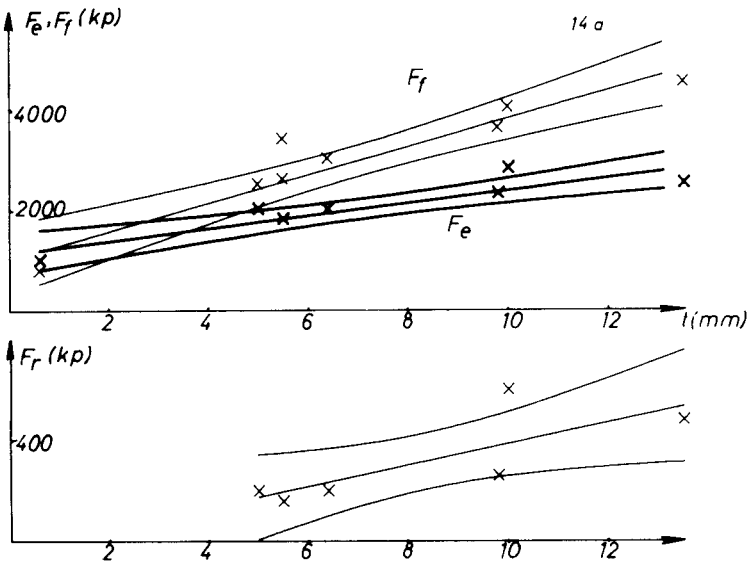
Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	105	7,9	1437	95	0,34	37	1191	94	19,2	49,4	695
F_f	209	22	583	270	0,78	65	459	63	155	108	2778
F_r	31,7	2,0	29	26	0,918	0,044	42,4	4,2	0,998	0,758	63,3

Annexe 6.122

Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %). Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées. Roche : Grès bigarré. Largeur d'enlevure : 40 mm. Hauteur de redent : 70 mm.

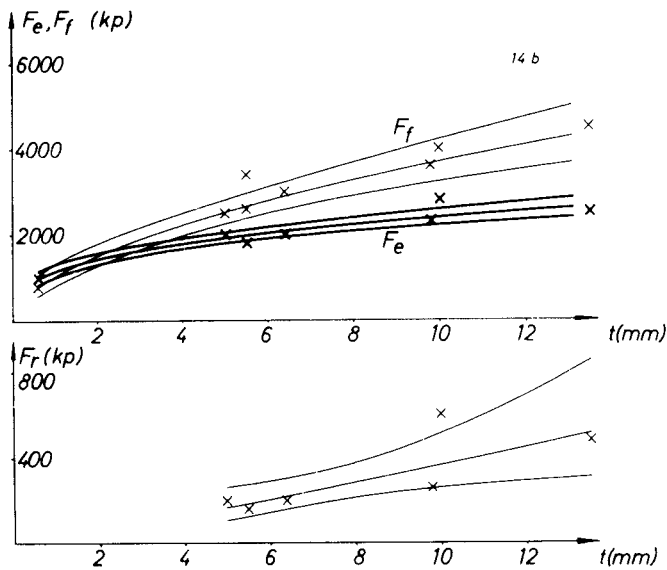
Compensation par droites

$F = a_1 t + a_2$



Compensation par paraboles

$F = t^{a_1'} \cdot a_2'$



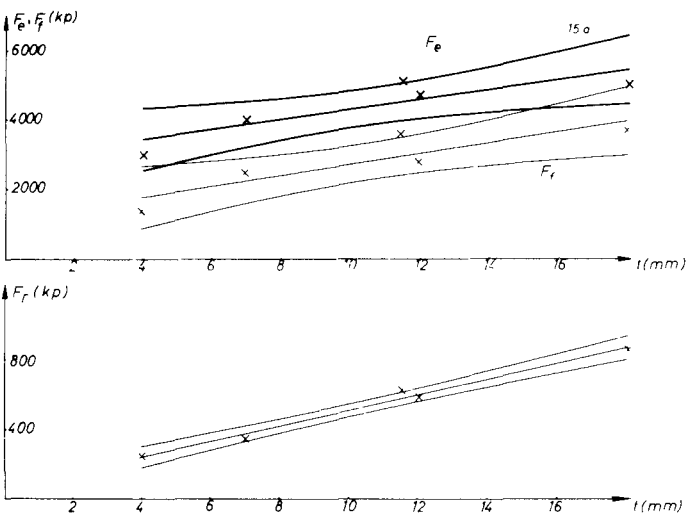
Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a_1'	ma_1'	a_2'	ma_2'	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	123	26	1160	220	0,313	0,035	1160	80	76,8	46,9	333
F_f	275	47	101	360	0,546	0,067	1046	130	241	211	1459
F_r	42	17	-35	150	1,13	0,36	26	20	16,3	16,8	32,2

Annexe 6.131

Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %). Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées. Roche : Grès bigarré. Largeur d'enlevure : 60 mm. Hauteur de redent : 40 mm

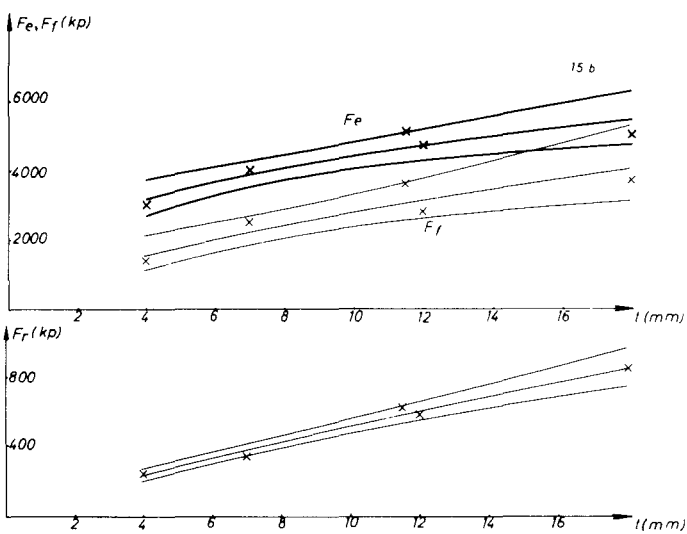
Compensation par droites

$F = a_1 t + a_2$



Compensation par paraboles

$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$

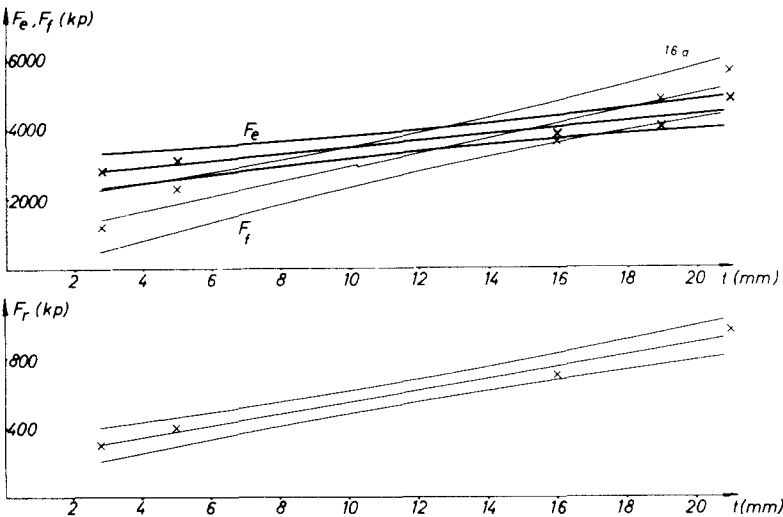


Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINEAIRE	PARABOL.	
F_e	141	47	2870	550	0,36	0,071	1920	310	254	152	765
F_f	155	47	1170	540	0,64	0,13	638	200	250	213	875
F_r	44,8	3,2	64,8	37	0,85	0,064	73,7	11	1,2	1,19	58,3

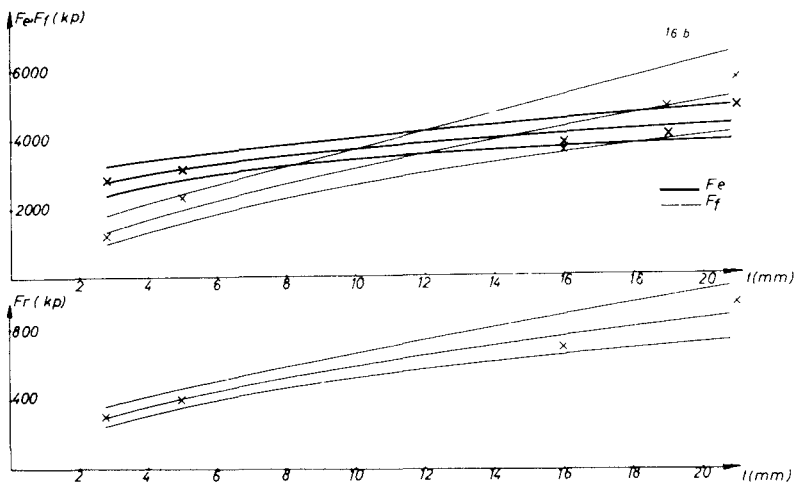
Annexe 6.132

Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %). Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées. Roche : Grès bigarré. Largeur d'enlevure : 60 mm. Hauteur de redent : 60 mm.

Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$


Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$


Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	89	17	2550	250	0,22	0,043	2180	230	81	118	620
F_f	209	29	827	430	0,67	0,086	661	140	233	270	3210
F_r	33,6	2,9	210	39	0,54	0,048	168	18	1,97	4,17	87

Annexe 6.211

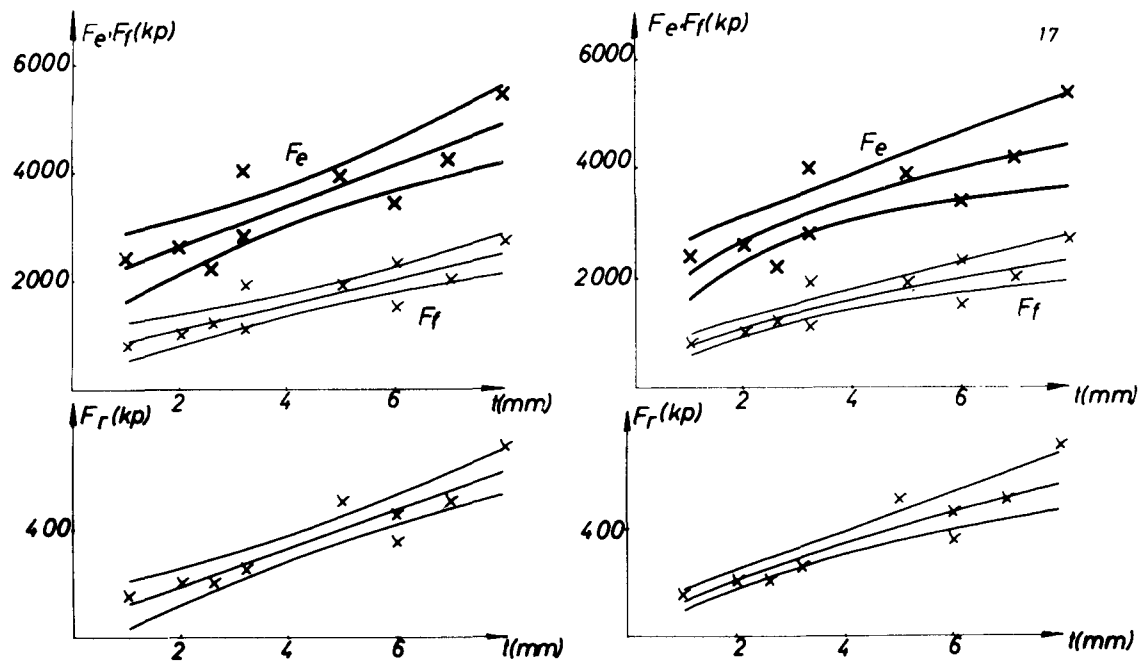
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées.

Roche : Schiste quartzitique.

Largeur d'enlevure : 30 mm.

Hauteur de redent : 20 mm.



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	373	84	1850	400	0,36	0,098	2070	280	326	399	1085
F_f	231	46	621	230	0,54	0,098	747	110	104	108	383
F_r	70	10	47	54	0,71	0,10	125	19	5,29	6,67	33,8

Annexe 6.212

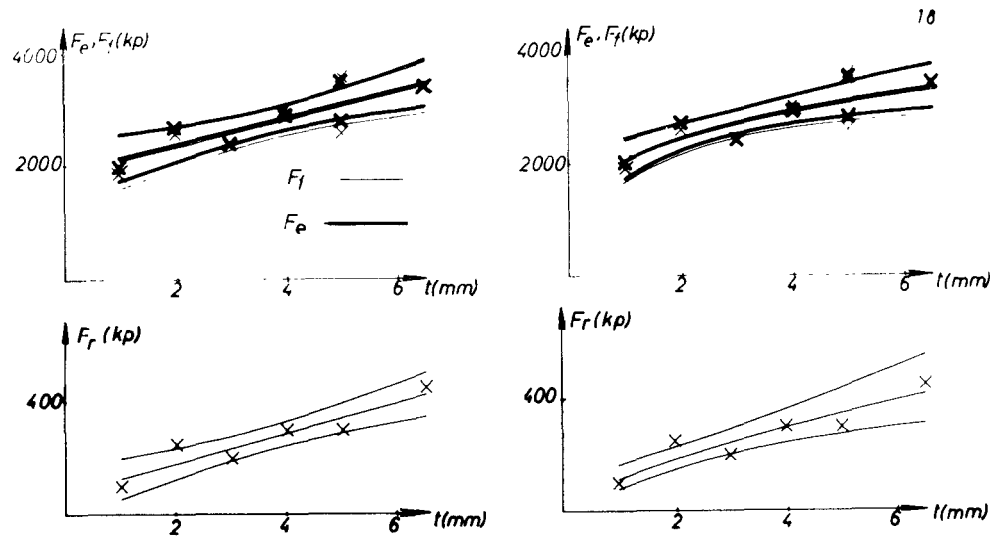
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées.

Roche : Schiste quartzitique.

Largeur d'enlevure : 30 mm

Hauteur de redent : 30 mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	238	62	1910	260	0,26	0,063	2030	170	85,0	84,6	276
F_f	240	75	1870	310	0,26	0,075	2000	200	123	126	315
F_r	54	11	72	43	0,69	0,13	111	19	2,34	3,46	13,7

Annexe 6.213

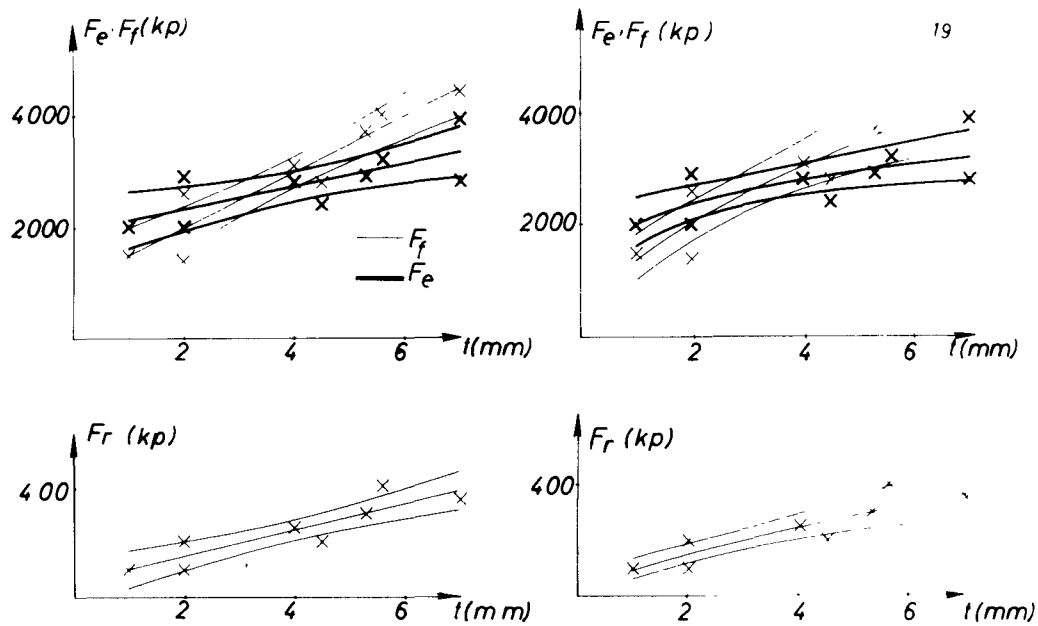
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées.

Roche : Schiste quartzitique.

Largeur d'enlevure : 30 mm.

Hauteur de redent : 40 mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

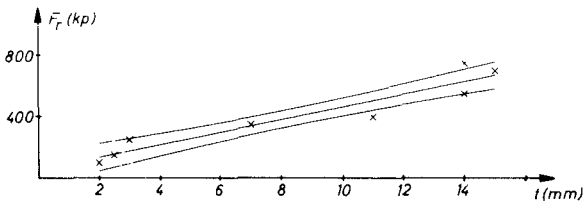
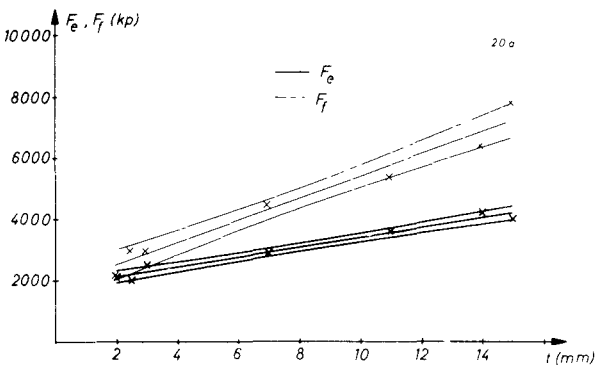
Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPEN- SATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	199	68	1910	320	0,23	0,08	1990	220	182	191	352
F_f	494	73	994	320	0,57	0,11	1360	210	163	183	1205
F_r	46,7	9,7	54	42	0,70	0,14	91	19	2,88	2,98	11,9

Annexe 6.214

Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %). Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées. Roche : Schiste quartzitique. Largeur d'enlevure : 30 mm. Hauteur de redent : 50 mm

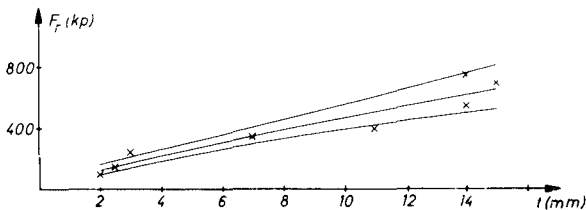
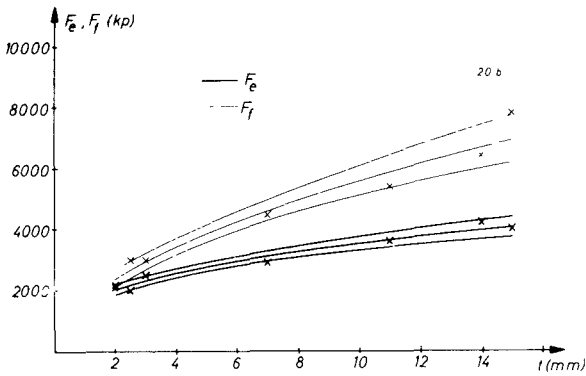
Compensation par droites

$F = a_1 t + a_2$



Compensation par paraboles

$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$



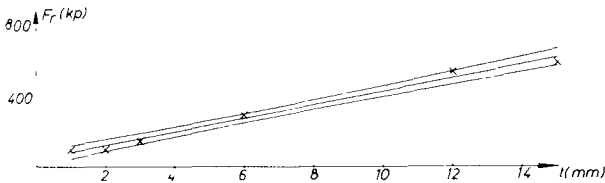
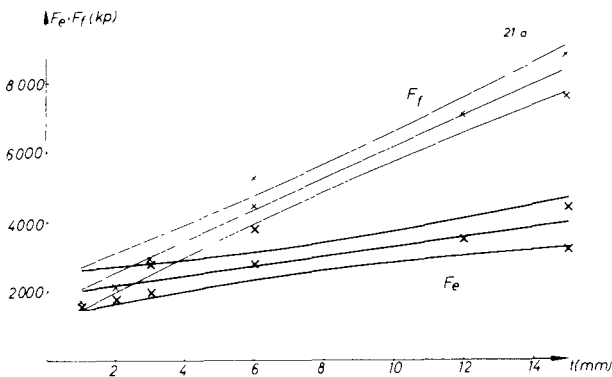
Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	159	13	1900	120	0,34	0,032	1580	100	31,2	35,9	309
F_f	359	31	1810	290	0,52	0,044	1650	140	184	243	4168
F_r	41,1	5,4	53	55	0,21	0,097	71,7	14	6,61	6,97	59

Annexe 6.215

Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %). Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées. Roche : Schiste quartzitique. Largeur d'enlèvement : 30 mm. Hauteur de redent : 70 mm.

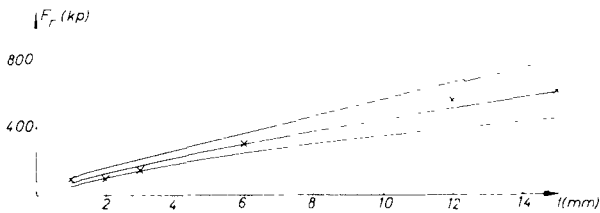
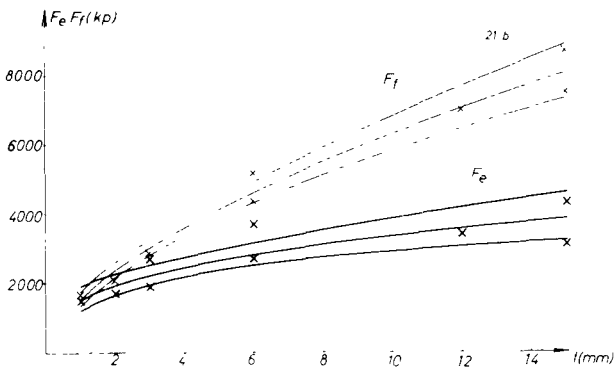
Compensation par droites

$F = a_1 t + a_2$



Compensation par paraboles

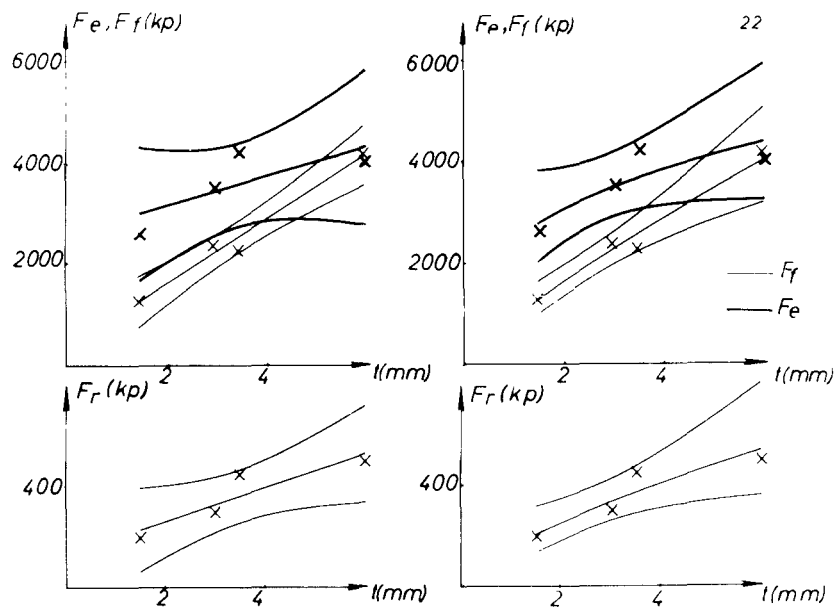
$F = t^{a_1'} \cdot a_2'$



Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a_1'	ma_1'	a_2'	ma_2'	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	136	38	1820	340	0,34	0,065	1510	180	371	283	904
F_f	447	37	1580	350	0,60	0,035	1550	100	322	203	6859
F_r	38,9	2,3	46	19	0,75	0,087	76,5	12	0,206	1,27	51

Annexe 6.22

Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %). Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées. Roche : Schiste quartzitique. Largeur d'enlèvement : 50 mm. Hauteur de redent : 50 mm.



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

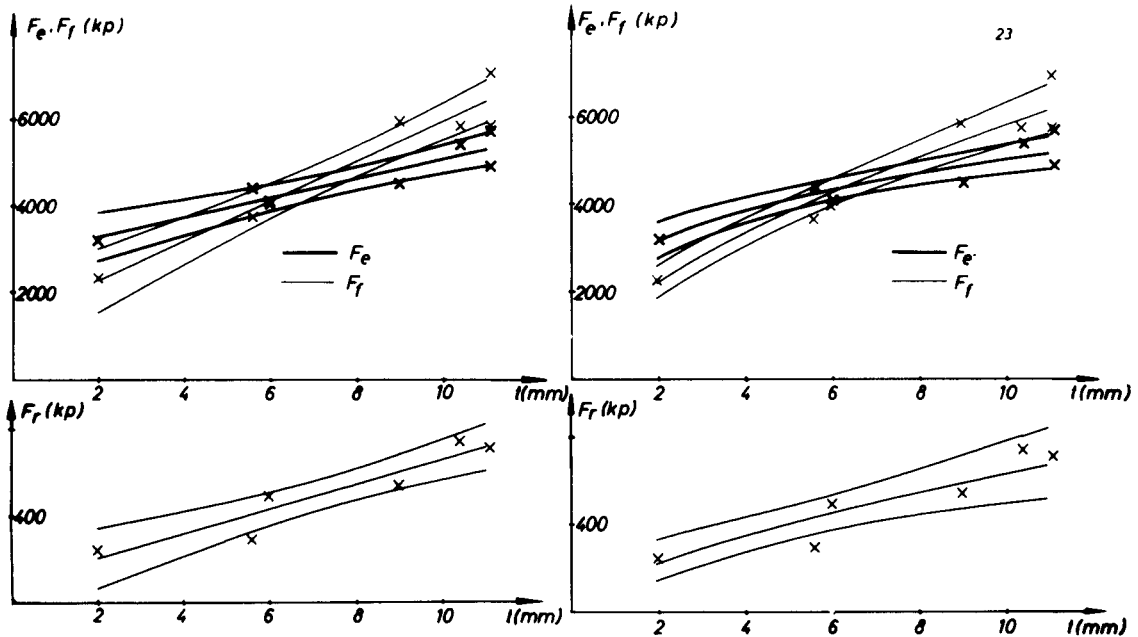
Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	290	170	2550	670	0,33	0,12	2400	370	320	230	509
F_f	638	67	316	260	0,82	0,096	914	110	47,3	62,2	1456
F_r	66,6	22	129	85	0,69	0,16	155	32	5,10	4,44	18,9

Annexe 6.311

Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %). Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées. Roche : Grès de la Ruhr. Largeur d'enlevure : 30 mm
Hauteur de redent : 30 mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINEAIRE	PARABOL.	
F_e	223	41	2830	350	0,29	0,048	2570	250	121	132	700
F_f	457	54	1320	460	0,60	0,061	1420	170	210	251	2672
F_r	56	10	97	83	0,64	0,15	142	42	6,48	8,85	43

Annexe 6.312

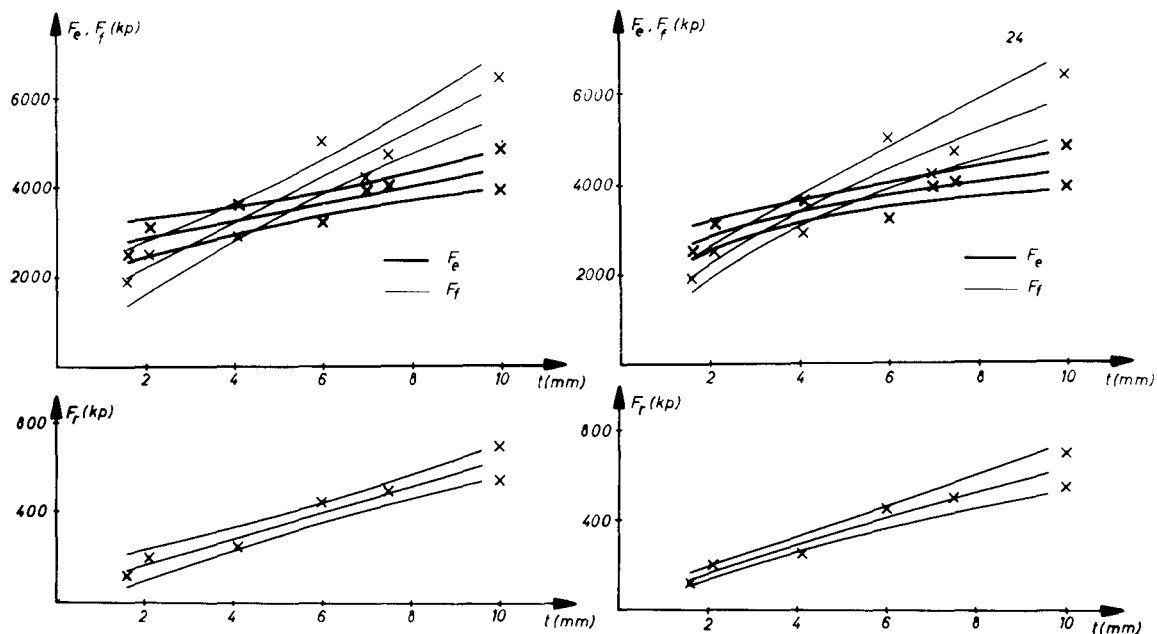
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées.

Roche : Grès de la Ruhr.

Largeur d'enlèvement : 30 mm

Hauteur de redent : 40 mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINEAIRE	PARABOL.	
F_e	186	43	2490	290	0,25	0,054	2360	230	140	140	485
F_f	501	65	1190	400	0,60	0,076	1450	180	237	284	2523
F_r	58,6	6,8	49	45	0,84	0,082	89	12	3,37	3,28	44,2

Annexe 6.313

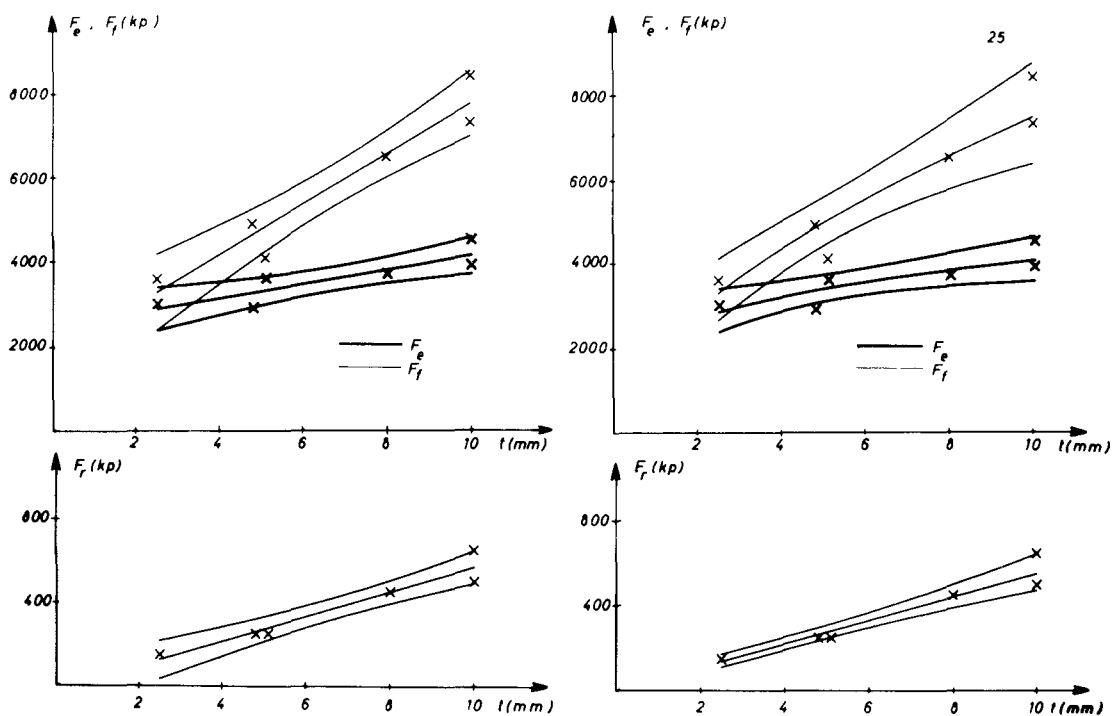
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées.

Roche : Grès de la Ruhr.

Largeur d'enlevure : 30 mm

Hauteur de redent : 50 mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPEN- SATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	167	47	2460	340	0,25	0,084	2240	350	106	127	352
F_f	594	83	1790	610	0,58	0,10	1910	370	331	463	3608
F_r	59,2	8,2	-23	60	0,99	0,10	55	10	3,22	3,46	35,6

Annexe 6.321

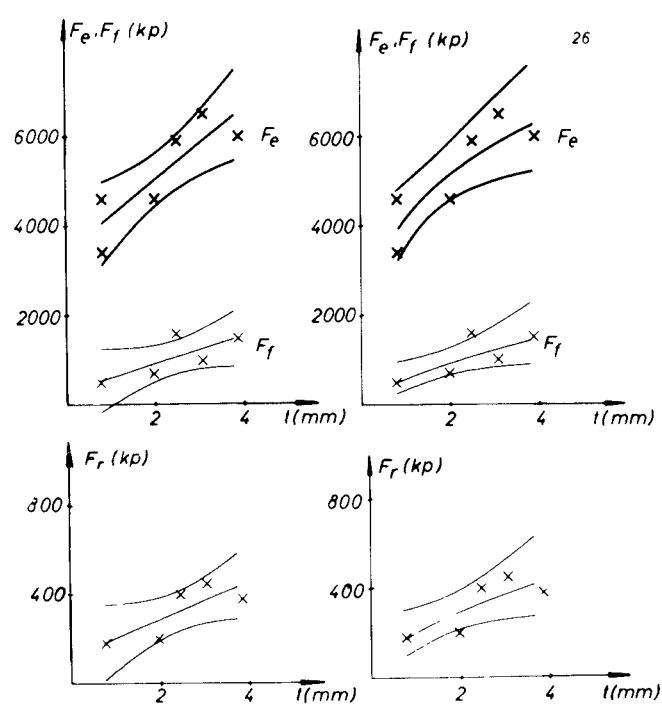
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées.

Roche : Grès de la Ruhr.

Largeur d'enlevure : 40 mm.

Hauteur de redent : 10 mm



Compensation par droites

Compensation par paraboles

$$F = a_1 t + a_2$$

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées S ² /10 ³		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a ₁	ma ₁	a ₂	ma ₂	a' ₁	ma' ₁	a' ₂	ma' ₂	LINÉAIRE	PARABOL.	
F _e	802	240	3410	590	0,30	0,09	4190	330	446	413	1355
F _f	314	150	287	410	0,68	0,25	566	130	131	130	233
F _r	84	36	114	98	0,58	0,22	191	40	7,33	7,1	15,2

Annexe 6.322

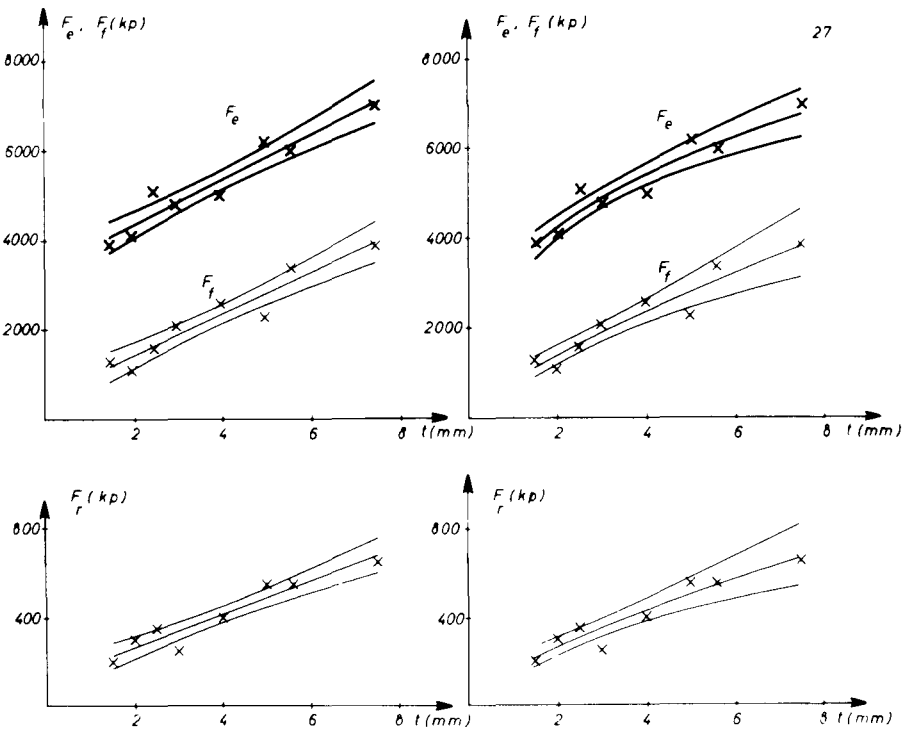
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées.

Roche : Grès de la Ruhr.

Largeur d'enlèvement : 40mm

Hauteur de redent : 20 mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	501	59	3310	250	0,35	0,043	3340	190	104	104	1137
F_f	462	58	490	250	0,76	0,10	817	120	98,3	98,6	976
F_r	75,1	9,8	114	42	0,70	0,11	158	24	2,85	2,81	26

Annexe 6.323

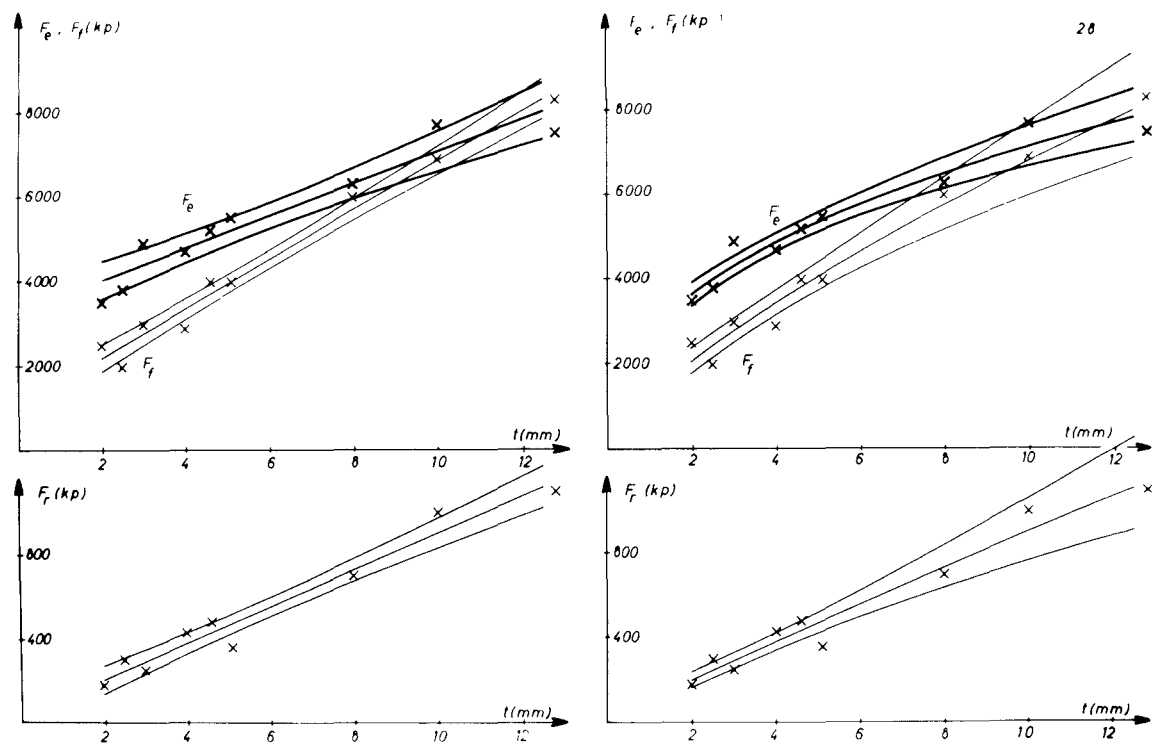
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées.

Roche : Grès de la Ruhr.

Largeur d'enlevure : 40 mm

Hauteur de redent : 30 mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPEN- SATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINEAIRE	PARABOL.	
F_e	379	45	3260	310	0,41	0,037	2720	170	231	138	2180
F_f	581	32	1040	210	0,74	0,071	1230	150	115	123	4740
F_r	87,1	6,8	29	46	0,94	0,092	102	16	5,09	5,13	109

Annexe 6.324

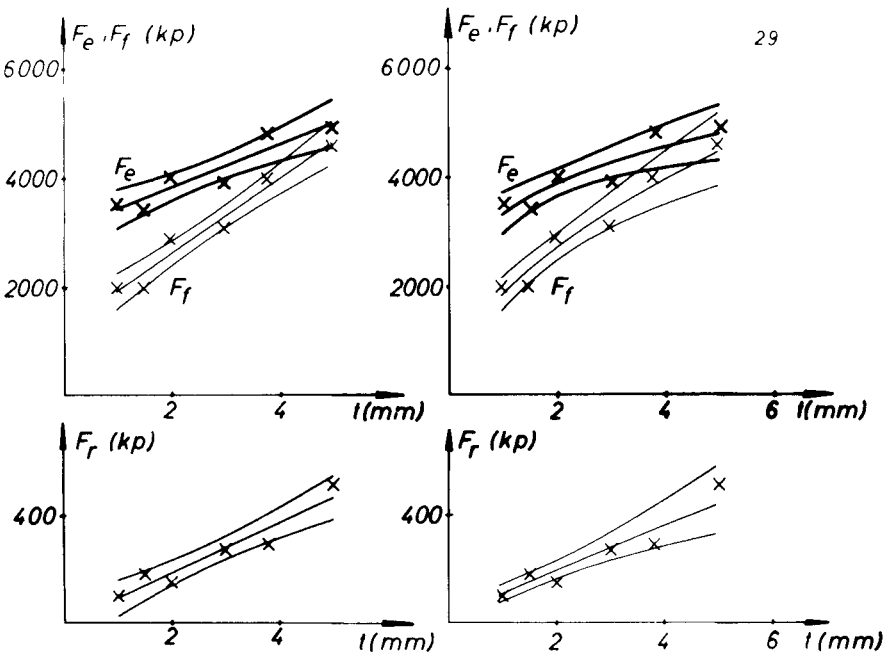
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées.

Roche : Grès de la Ruhr.

Largeur d'enlevure : 40 mm

Hauteur de redent : 40 mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	392	76	3010	230	0,23	0,053	3310	180	66,9	83,2	406
F_f	681	70	1240	210	0,55	0,075	1830	140	56,9	68,3	1104
F_r	92	14	-1,7	42	0,90	0,14	100	14	2,26	2,77	21,2

Annexe 6.331

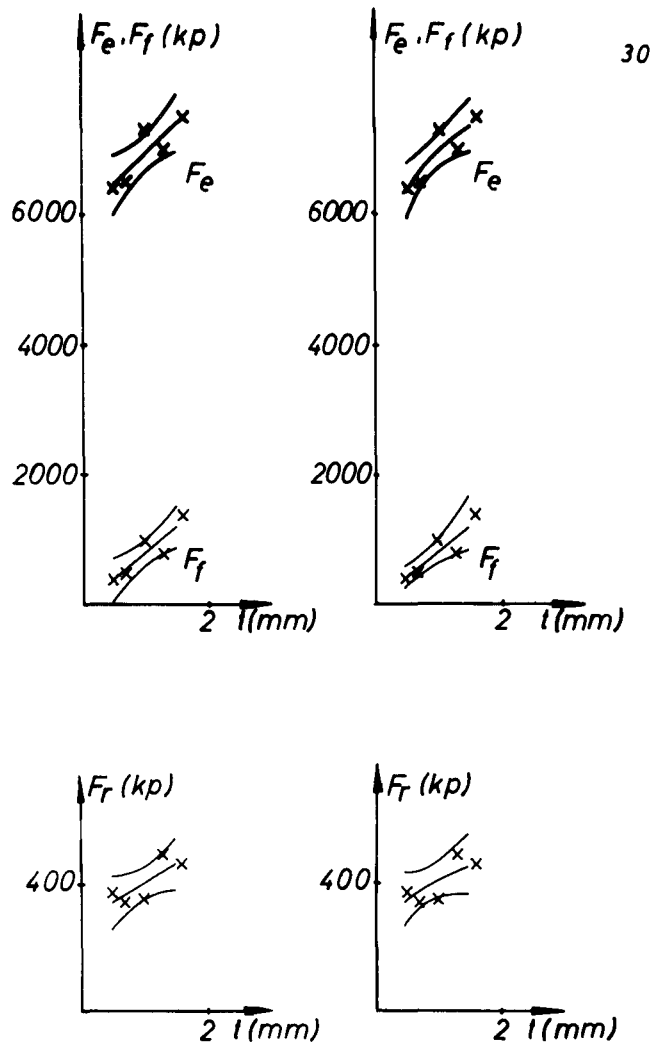
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées.

Roche : Grès de la Ruhr.

Largeur d'enlevure : 60 mm

Hauteur de redent : 10 mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a_1'} \cdot a_2'$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a_1'	ma_1'	a_2'	ma_2'	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	959	290	5960	320	0,13	0,037	6980	110	68,9	61,5	233
F_f	822	220	- 18	240	1,01	0,22	790	77	38,3	38,7	162
F_r	121	54	277	59	0,26	0,13	404	24	2,34	2,69	4,65

Annexe 6.332

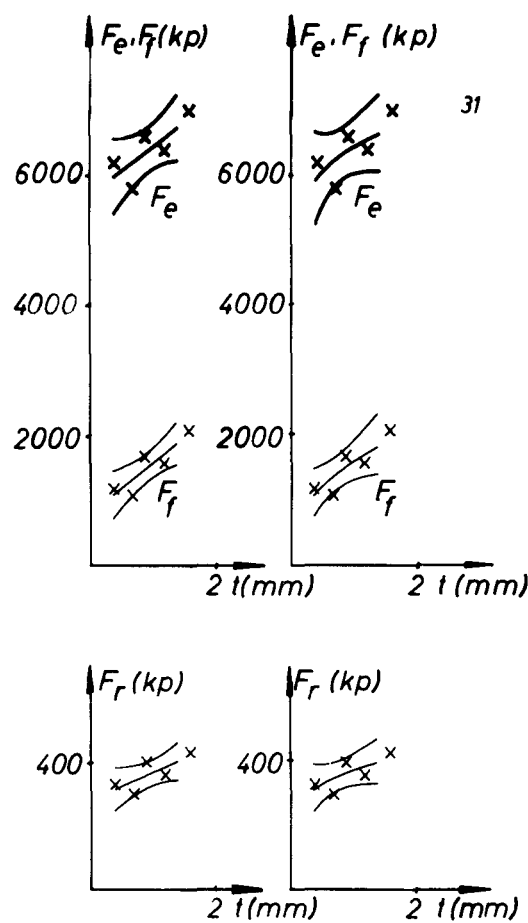
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées.

Roche : Grès de la Ruhr.

Largeur d'enlèvement : 60 mm.

Hauteur de redent : 20 mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a_1'} \cdot a_2'$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a_1'	ma_1'	a_2'	ma_2'	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	751	350	5670	360	0,09	0,055	6470	180	106	135	200
F_f	784	220	787	230	0,41	0,15	1590	120	42,7	52,8	163
F_r	87	41	279	43	0,19	0,10	371	20	1,45	1,66	2,73

Annexe 6.333

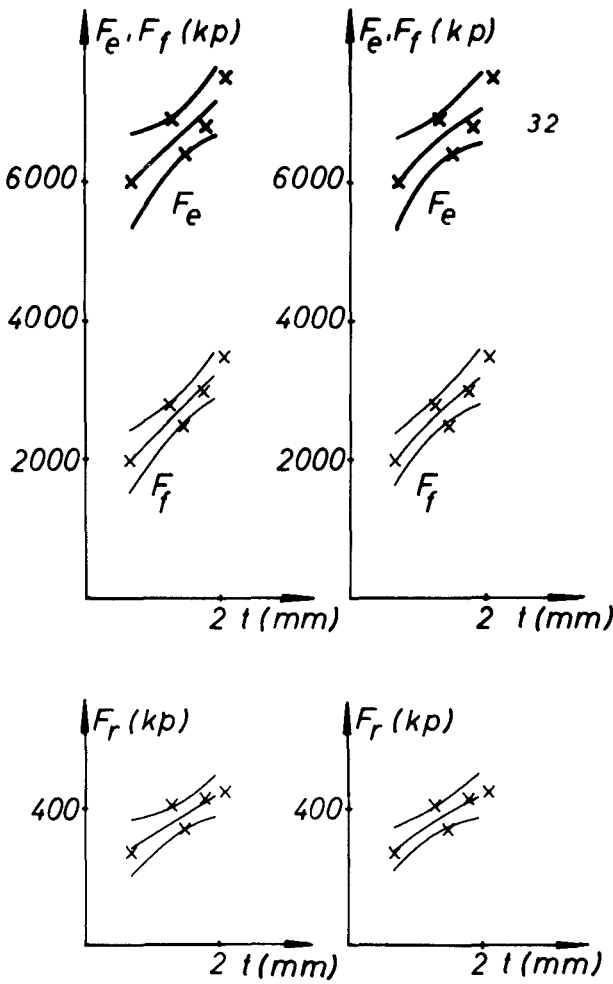
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de compensation (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées.

Roche : Grès de la Ruhr.

Largeur d'enlevure : 60 mm

Hauteur de redent : 30 mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	914	300	5360	480	0,16	0,06	6340	190	107	122	317
F_f	989	300	1290	320	0,46	0,10	2330	120	49,2	58,5	313
F_r	123	37	197	58	0,44	0,12	322	20	1,62	1,51	5,48

Annexe 6.334

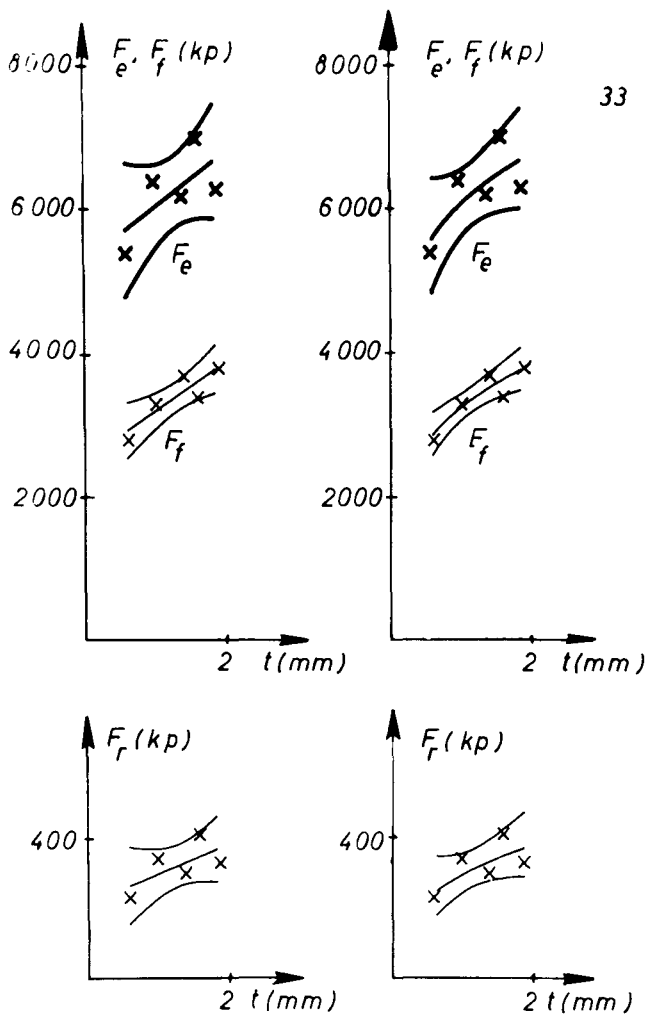
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées.

Roche : Grès de la Ruhr.

Largeur d'enlèvement : 60 mm

Hauteur de redent : 40 mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a_1'} \cdot a_2'$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a_1'	ma_1'	a_2'	ma_2'	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	769	470	5260	650	0,15	0,074	6050	200	232	192	328
F_f	692	190	2500	270	0,24	0,055	3220	80	40,5	31,7	129
F_r	84	55	212	76	0,35	0,17	296	23	3,21	2,90	4,25

Annexe 6.335

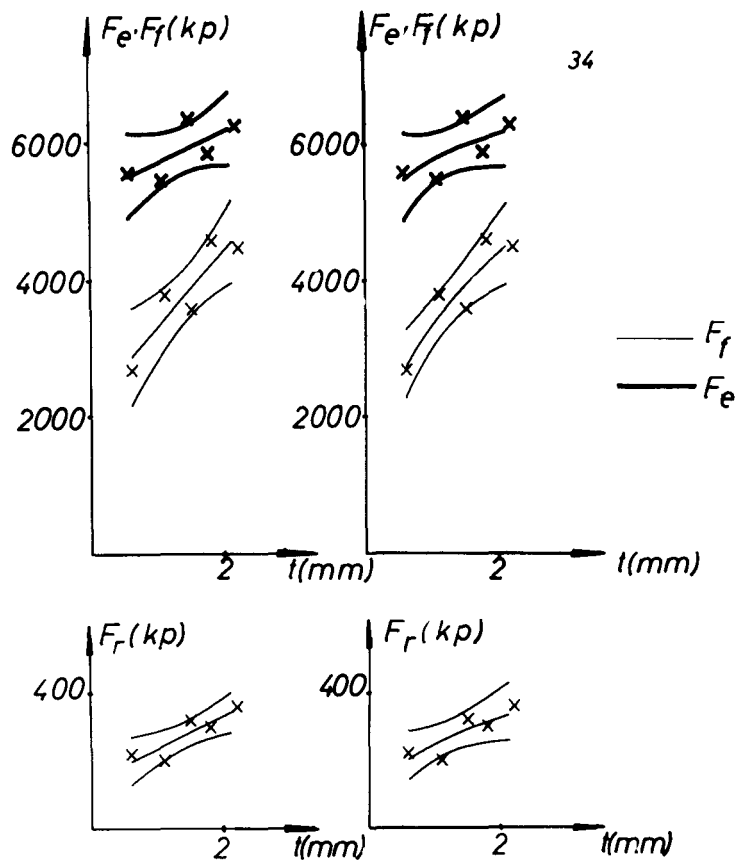
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées.

Roche : Grès de la Ruhr.

Largeur d'enlevure : 60 mm

Hauteur de redent : 50 mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	471	260	5260	400	0,095	0,054	5770	170	103	107	163
F_f	1130	300	2210	460	0,39	0,085	3380	150	137	116	593
F_r	96	29	140	46	0,40	0,16	244	21	1,36	1,68	4,6

Annexe 6.411

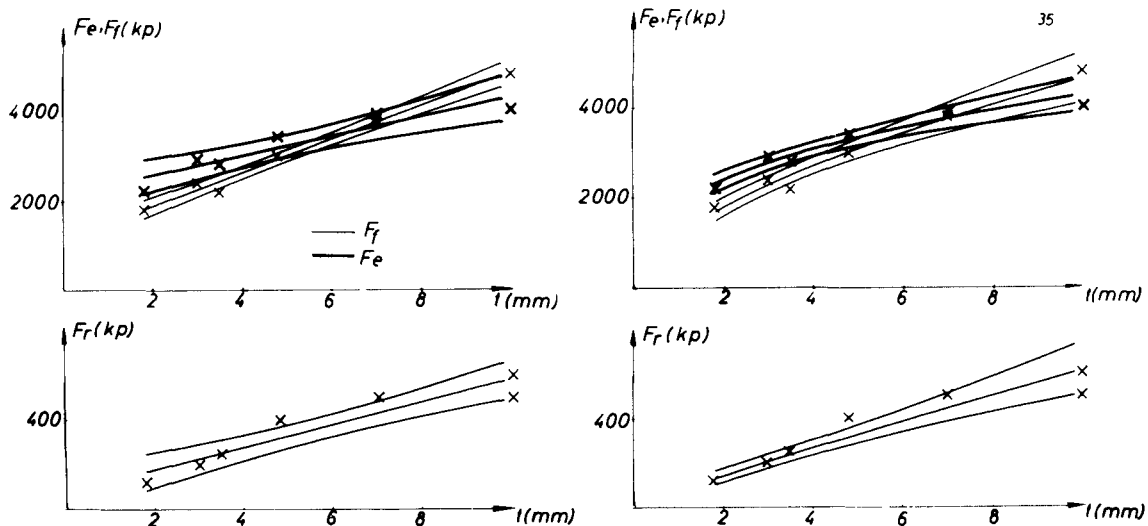
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées.

Roche : Granit.

Largeur d'enlevure : 20 mm

Hauteur de redent: 20 mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

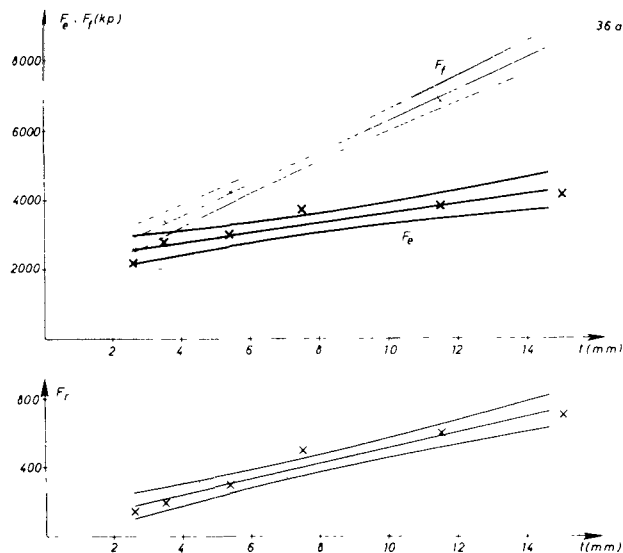
Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINEAIRE	PARABOL.	
F_e	214	42	2120	240	0,35	0,041	1850	120	81,9	37,3	484
F_f	369	22	1140	120	0,58	0,056	1210	110	22,8	36,9	1264
F_r	50,7	8,0	76	52	0,88	0,098	79	13	4,29	4,48	32,2

Annexe 6.412

Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %). Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées. Roche : Granit. Largeur d'enlevure : 20 mm.
Hauteur de redent : 30 mm.

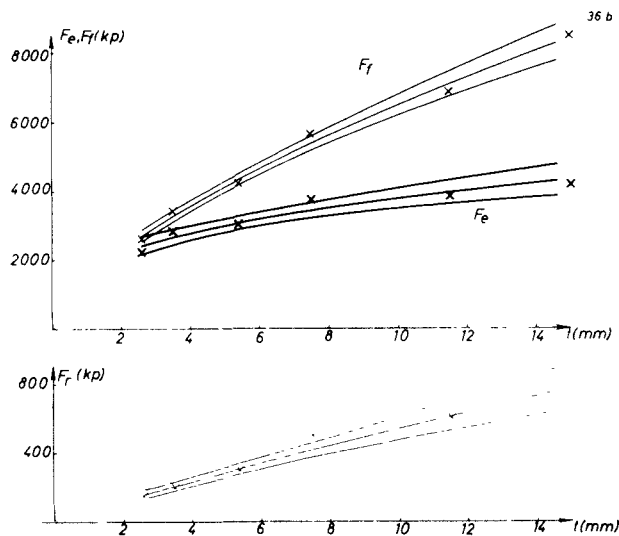
Compensation par
droites

$$F = a_1 t + a_2$$



Compensation par
paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$



Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPEN- SATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINEAIRE	PARABOL.	
F_e	137	28	2220	250	0,33	0,047	1730	160	97,0	49,8	519
F_f	449	27	1750	240	0,64	0,027	1440	73	89,8	42,2	4791
F_r	45,2	5,2	64	45	0,90	0,074	65,7	9,5	3,24	3,31	50,4

Annexe 6.421

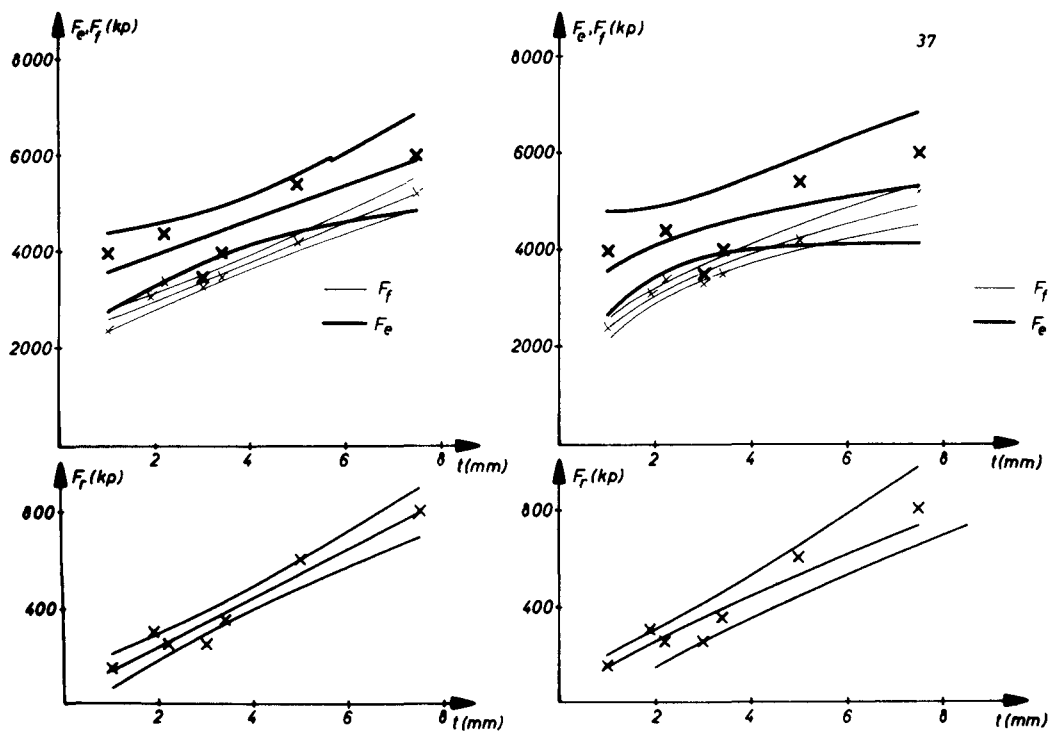
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées.

Roche : Granit.

Largeur d'enlevure : 30 mm

Hauteur de redent:30 mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	351	110	3250	470	0,19	0,10	3570	490	328	527	911
F_f	397	34	2220	130	0,35	0,036	2390	110	34,7	48,5	791
F_r	101	11	36	43	0,81	0,12	142	21	3,52	4,98	53

Annexe 6.422

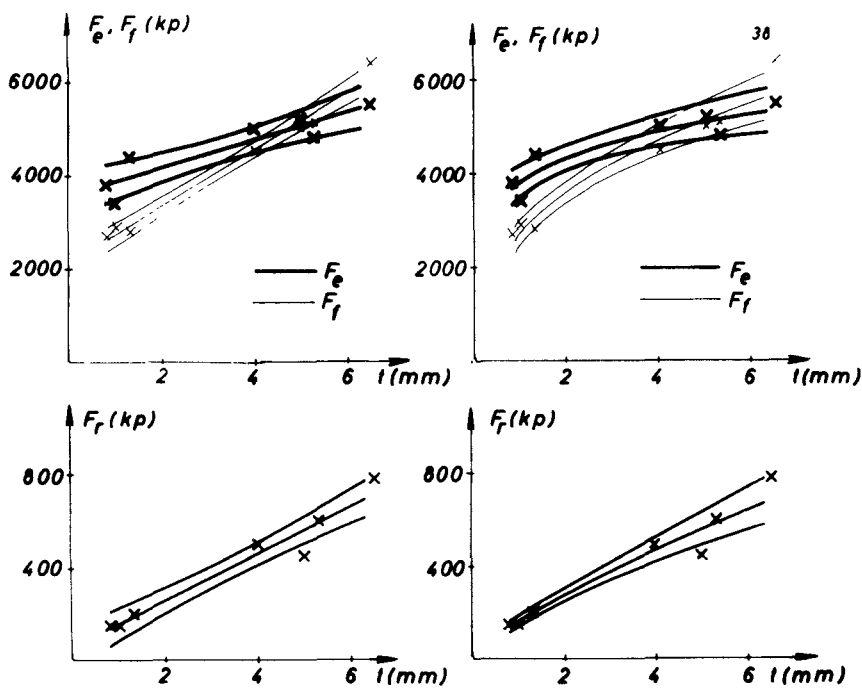
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées.

Roche : Granit.

Largeur d'enlevure : 30 mm

Hauteur de redent : 40 mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINEAIRE	PARABOL.	
F_e	294	60	3570	240	0,17	0,035	3820	170	122	103	581
F_f	603	38	2140	150	0,38	0,036	2780	130	48,8	141	2047
F_r	101	10	56	43	0,76	0,059	163	12	3,76	4,51	60,2

Annexe 6.423

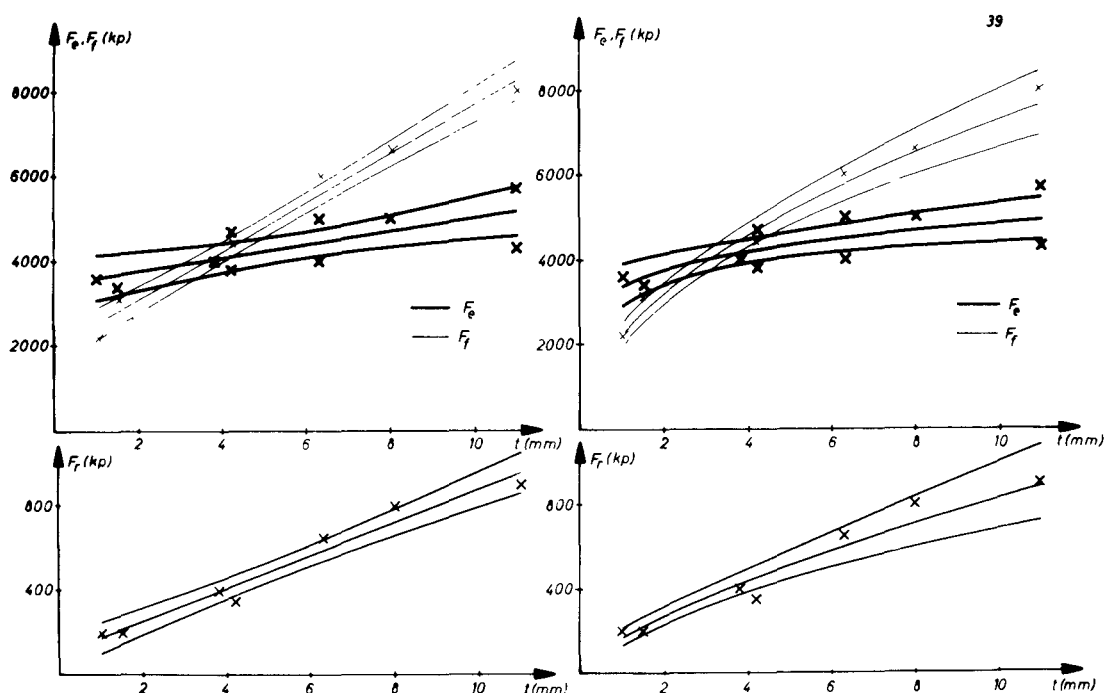
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées.

Roche : Granit.

Largeur d'enlevure : 30 mm

Hauteur de redent : 50 mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	154	49	3460	320	0,15	0,047	3370	270	270	262	534
F_f	568	34	1990	210	0,50	0,037	2250	130	92,8	114	4217
F_r	77,7	7,0	102	43	0,69	0,076	167	20	3,87	4,93	80,8

Annexe 6.424

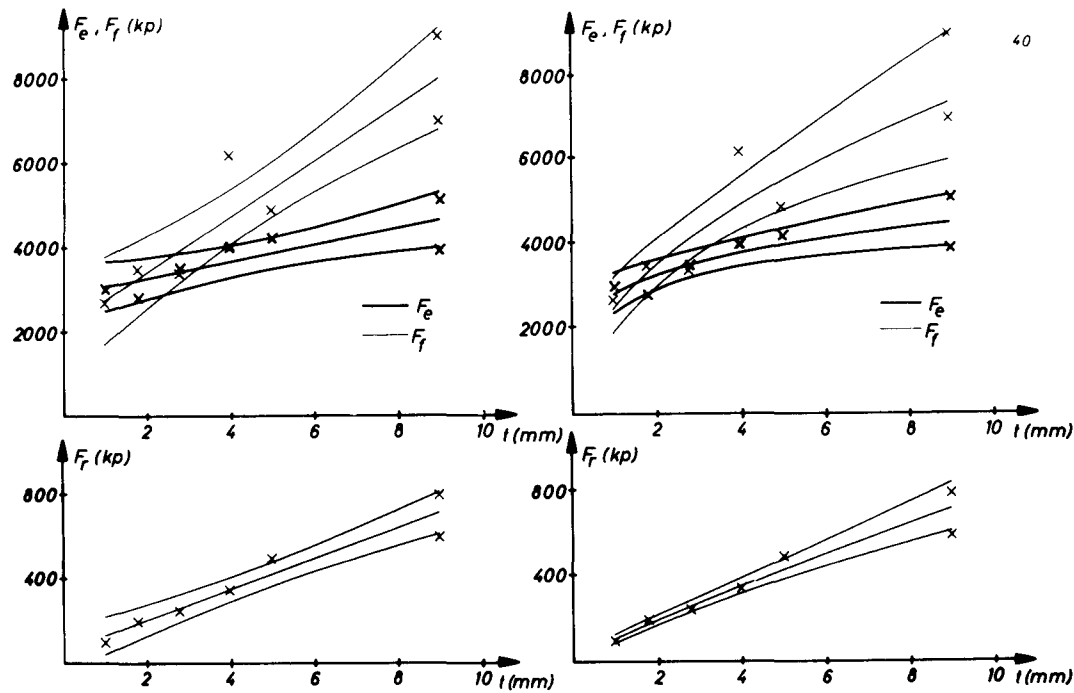
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées.

Roche : Granit.

Largeur d'enlevure : 30 mm

Hauteur de redent : 60 mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a_1'} \cdot a_2'$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a_1'	ma_1'	a_2'	ma_2'	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	196	61	2870	330	0,21	0,056	2800	230	237	199	605
F_f	654	110	2090	630	0,49	0,091	2470	330	878	1042	4641
F_r	73	9,3	59	51	0,86	0,065	108	11	5,51	5,21	60,7

Annexe 6.431

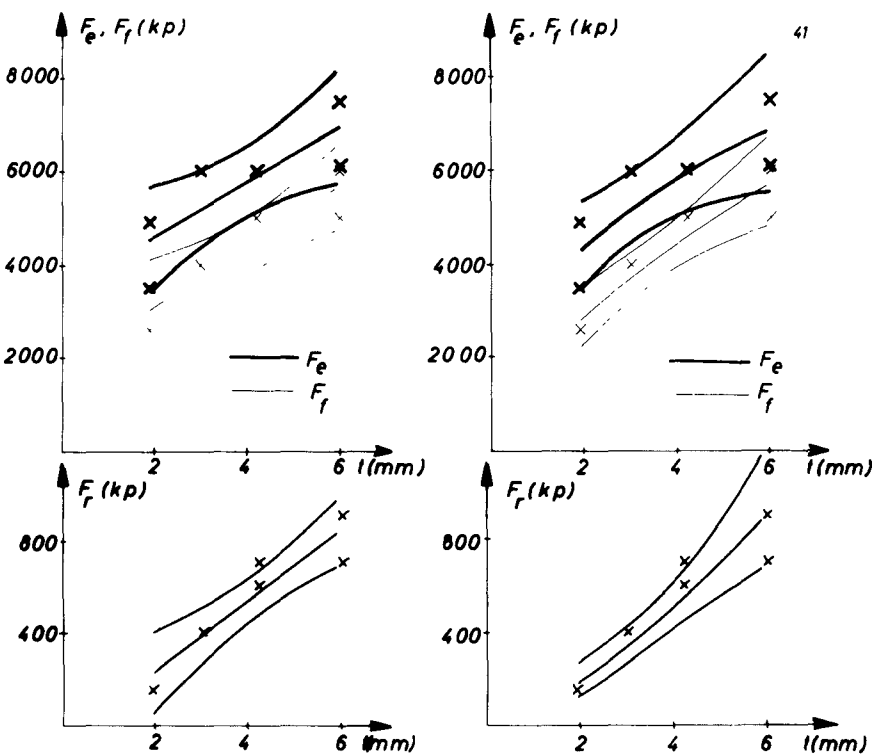
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées.

Roche : granit.

Largeur d'enlèvement : 40 mm

Hauteur de redent:40 mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a_1} \cdot a_2'$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPEN- SATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a_1'	ma_1'	a_2'	ma_2'	LINEAIRE	PARABOL.	
F_e	589	200	3400	850	0,41	0,13	3310	600	727	661	1811
F_f	648	160	1780	730	0,62	0,11	1870	310	349	298	1652
F_r	151	29	-62	130	1,40	0,22	73	23	11,6	18,3	69,6

Annexe 6.432

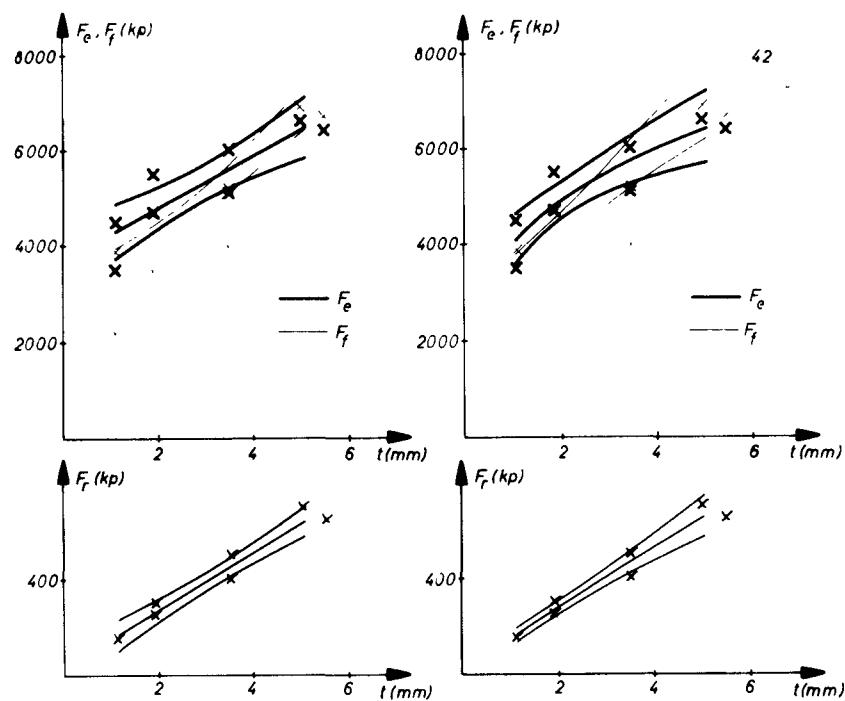
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées.

Roche : Granit.

Largeur d'enlevure : 40 mm

Hauteur de redent:50 mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINEAIRE	PARABOL.	
F_e	539	120	3700	400	0,29	0,064	3970	280	298	261	1101
F_f	828	170	2200	590	0,48	0,13	2800	400	653	719	2979
F_r	120	12	34	44	0,92	0,078	144	13	2,61	2,57	42,3

Annexe 6.433

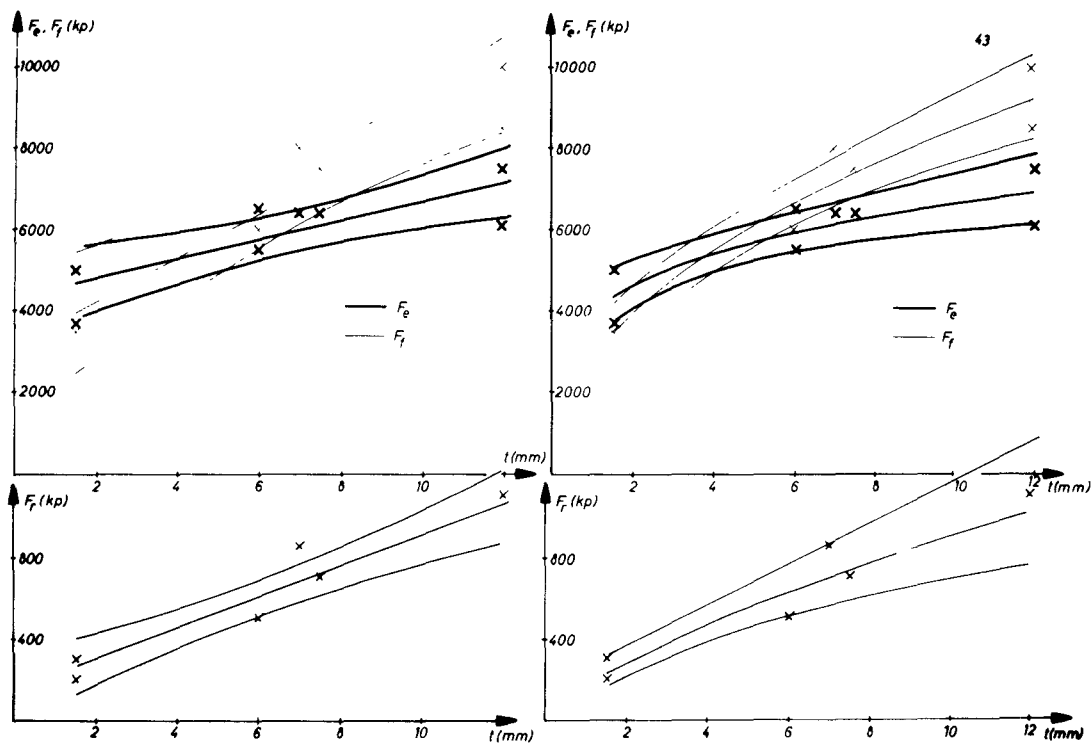
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes étagées.

Roche : Granit.

Largeur d'enlevure : 40 mm

Hauteur de redent : 60 mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINEAIRE	PARABOL.	
F_e	232	69	4330	520	0,22	0,054	3960	390	533	410	1324
F_f	532	97	3160	820	0,47	0,055	2870	310	749	563	5075
F_r	82	11	121	80	0,70	0,10	180	33	10,7	12,5	116

Annexe 7.11

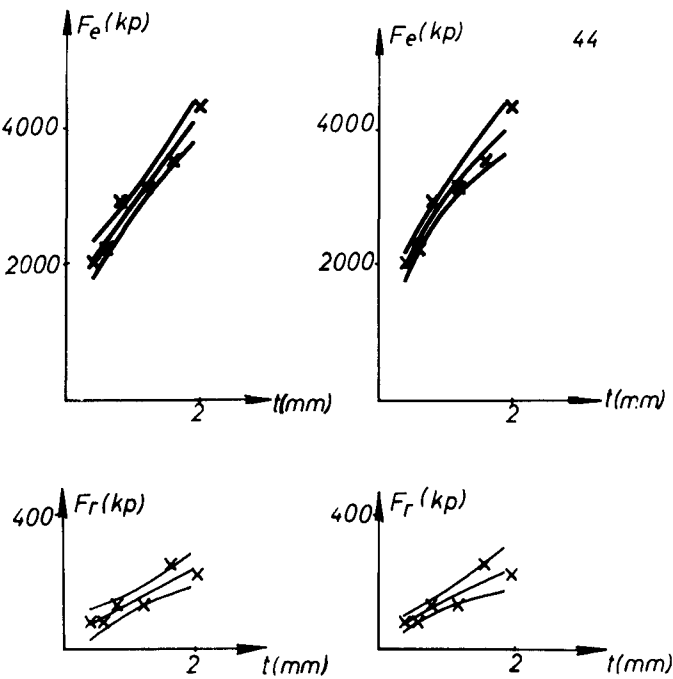
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes dans un plan.

Roche : Schiste quartzitique.

Largeur d'enlevure : 20 mm

Hauteur de redent: 0 mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	1340	140	1510	170	0,45	0,049	2960	81	37,6	42,9	720
F_f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F_r	105	23	31	29	0,73	0,14	139	11	1,05	1,06	5,08

Annexe 7.12

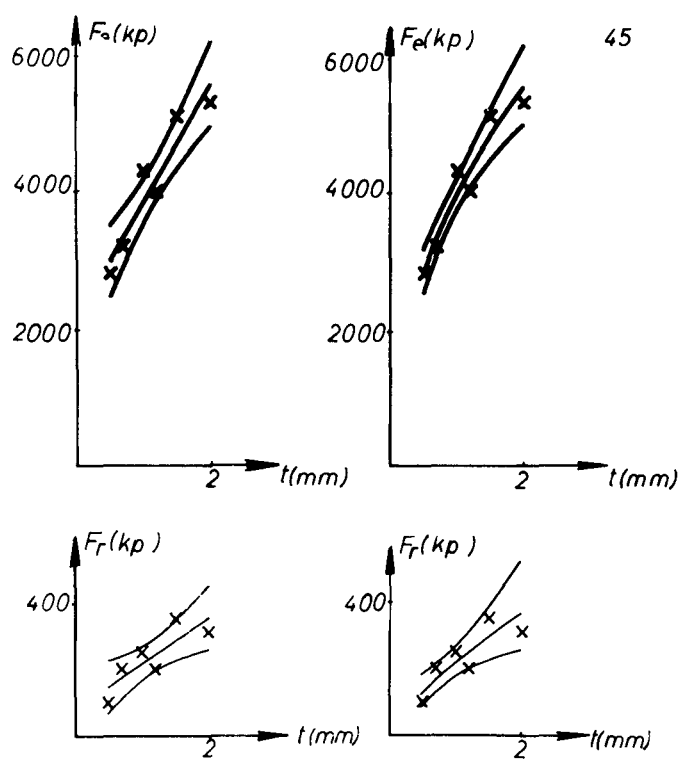
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes dans un plan.

Roche : Schiste quartzitique.

Largeur d'enlevure : 30 mm

Hauteur de redent : 0 mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées S ² /10 ³		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a ₁	ma ₁	a ₂	ma ₂	a' ₁	ma' ₁	a' ₂	ma' ₂	LINÉAIRE	PARABOL.	
Fe	1720	290	2120	360	0,48	0,061	3930	110	129	93,4	9988
Ff	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fr	136	44	78	56	0,77	0,20	211	20	3,01	2,96	7,94

Annexe 7.13

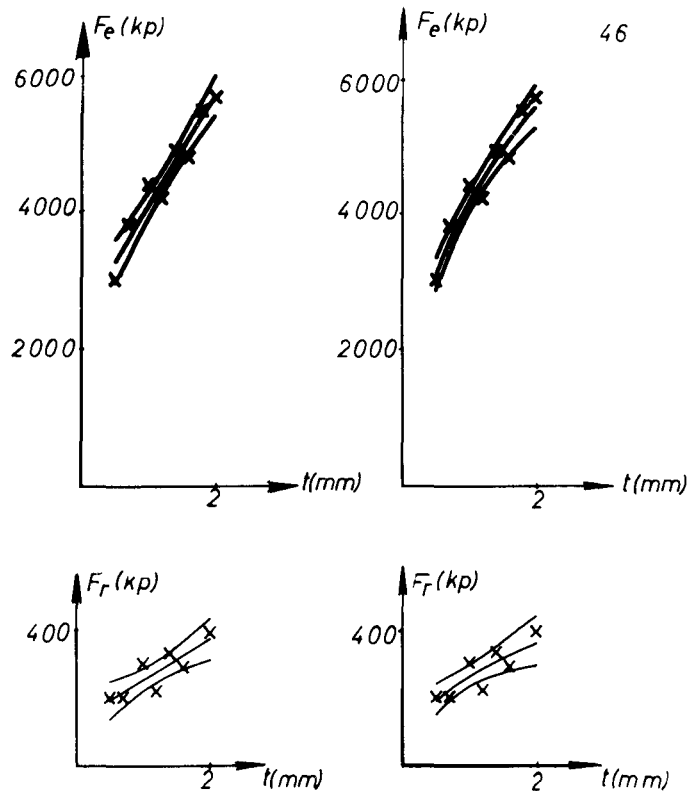
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes dans un plan.

Roche : Schiste quartzitique.

Largeur d'enlevure : 40 mm

Hauteur de redent : 0 mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINEAIRE	PARABOL.	
F_e	1630	170	2450	240	0,42	0,042	4170	84	61,0	54,7	788
F_f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F_r	119	31	132	40	0,45	0,13	256	15	1,62	1,79	5,22

Annexe 7.14

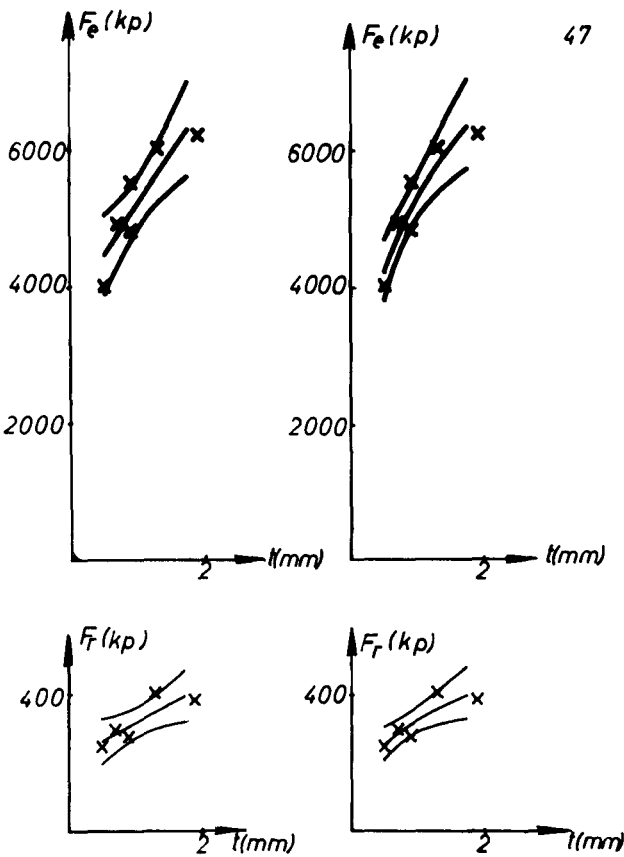
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes dans un plan.

Roche : Schiste quartzitique.

Largeur d'enlevure : 50 mm

Hauteur de redent : 0 mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINEAIRE	PARABOL.	
F_e	1460	380	3720	430	0,32	0,064	5270	140	182	122	683
F_f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F_r	108	37	211	44	0,36	0,10	326	16	1,77	1,48	4,93

Annexe 7.15

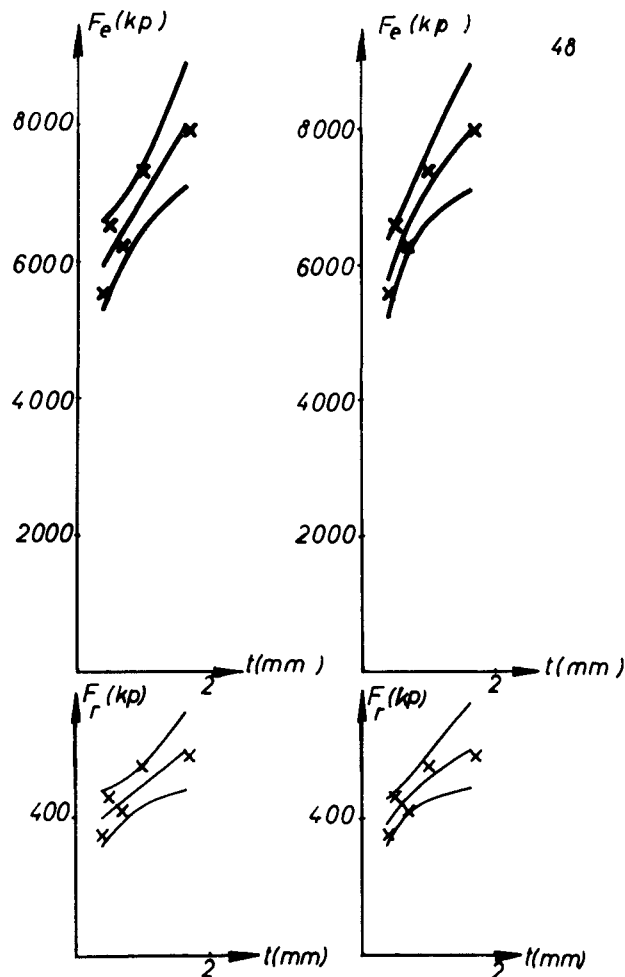
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes dans un plan.

Roche : Schiste quartzitique.

Largeur d'enlevure : 60 mm

Hauteur de redent : 0 mm



Compensation par droites

Compensation par paraboles

$F = a_1 t + a_2$

$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINEAIRE	PARABOL.	
F_e	1640	410	5260	400	0,22	0,052	7070	220	191	143	882
F_f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F_r	156	52	337	50	0,31	0,093	508	28	2,96	2,32	8,85

- Annexe 7.21

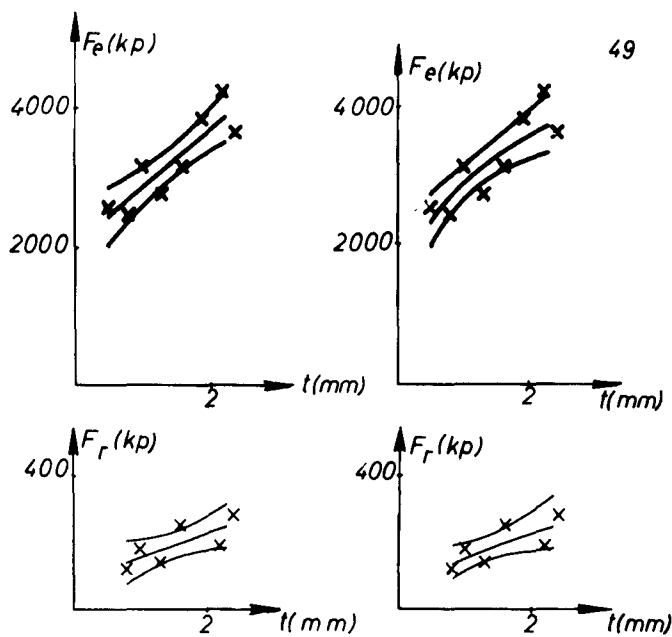
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes dans un plan.

Roche : Grès de la Ruhr.

Largeur d'enlèvement : 20 mm

Hauteur de redent : 0 mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINEAIRE	PARABOL.	
F_e	831	180	2050	290	0,30	0,076	2960	130	112	129	4,17
F_f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F_r	72	31	81	52	0,58	0,23	14,9	19	2,07	2,04	3,82

Annexe 7.22

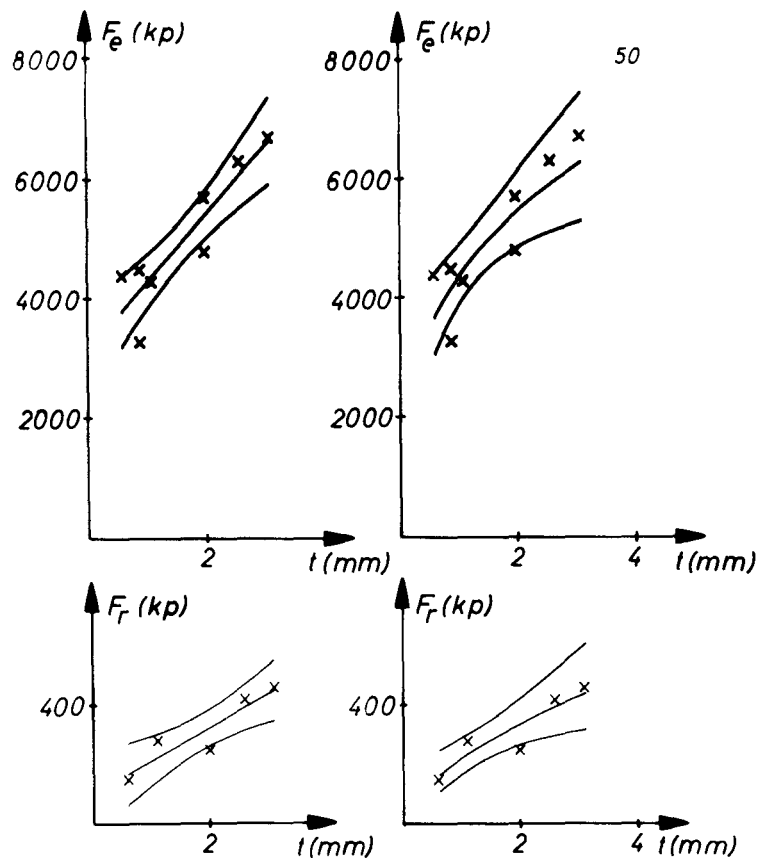
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes dans un plan.

Roche : Grès de la Ruhr.

Largeur d'enlèvement : 40 mm

Hauteur de redent : 0 mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINEAIRE	PARABOL.	
F_e	1130	220	3130	410	0,32	0,091	4350	260	283	374	1299
F_f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F_r	113	27	99	58	0,60	0,15	216	26	3,32	3,63	16,2

Annexe 7.23

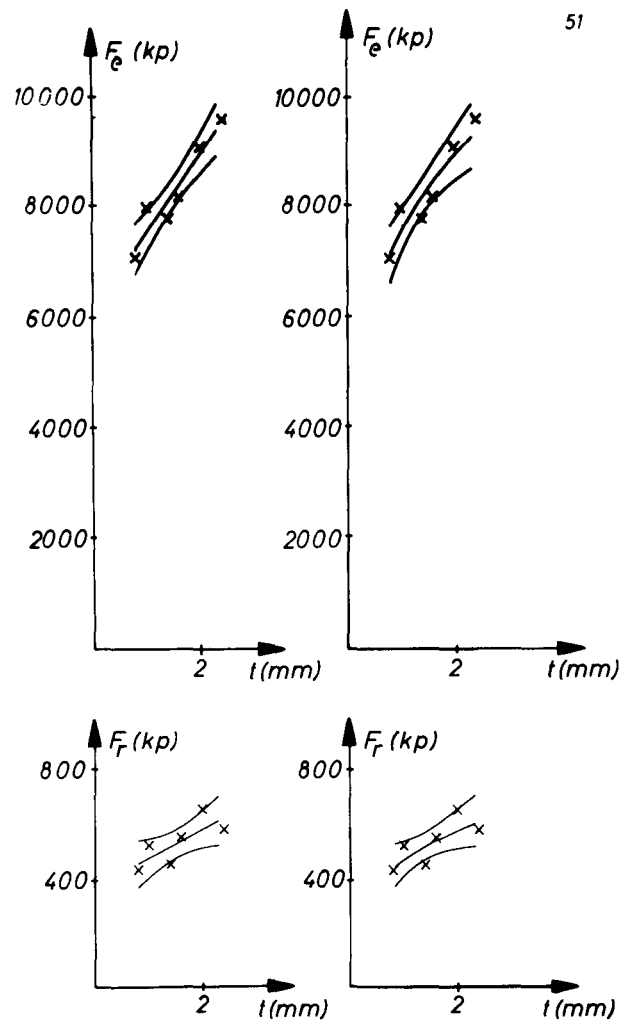
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Molettes coupantes dans un plan.

Roche : Grès de la Ruhr.

Largeur d'enlevure : 60 mm

Hauteur de redent : 0 mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	1430	230	6100	370	0,24	0,047	7560	190	98,0	129	824
F_f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F_r	104	43	369	71	0,29	0,11	472	29	3,47	3,39	6,74

Annexe 8.111

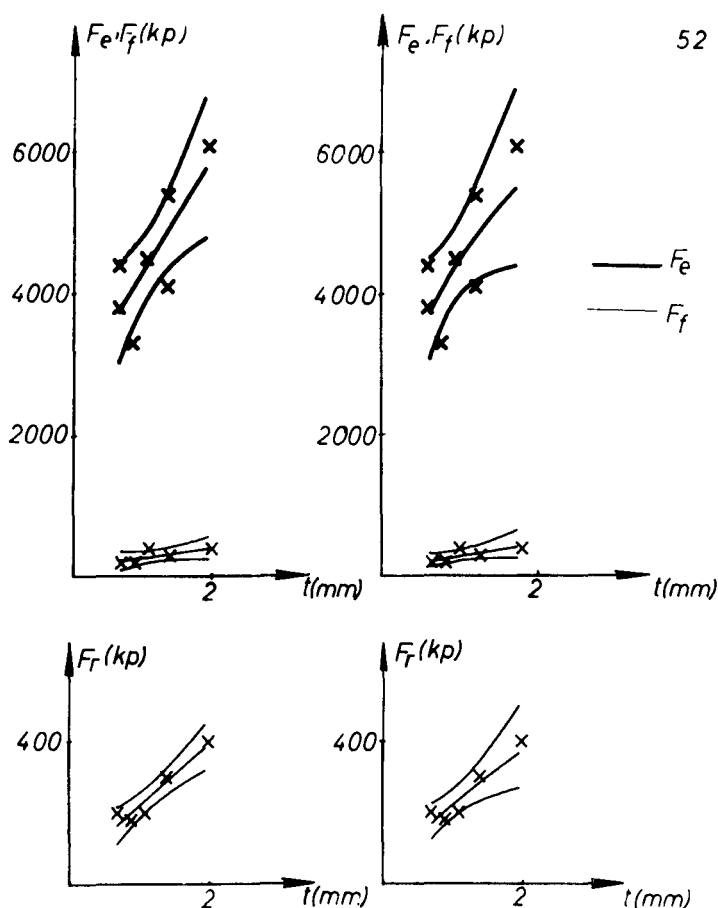
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Confection d'une entaille.

Roche : Schiste quartzitique.

Largeur d'enlevure : 40 mm

Hauteur de redent : $s_1 = 10$ mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINEAIRE	PARABOL.	
F_e	1630	540	2600	680	0,38	0,16	4270	260	394	451	911
F_f	145	76	121	99	0,68	0,30	261	30	6,03	5,91	10
F_r	175	31	41	41	0,75	0,20	220	17	1,02	1,29	8,68

Annexe 8.112

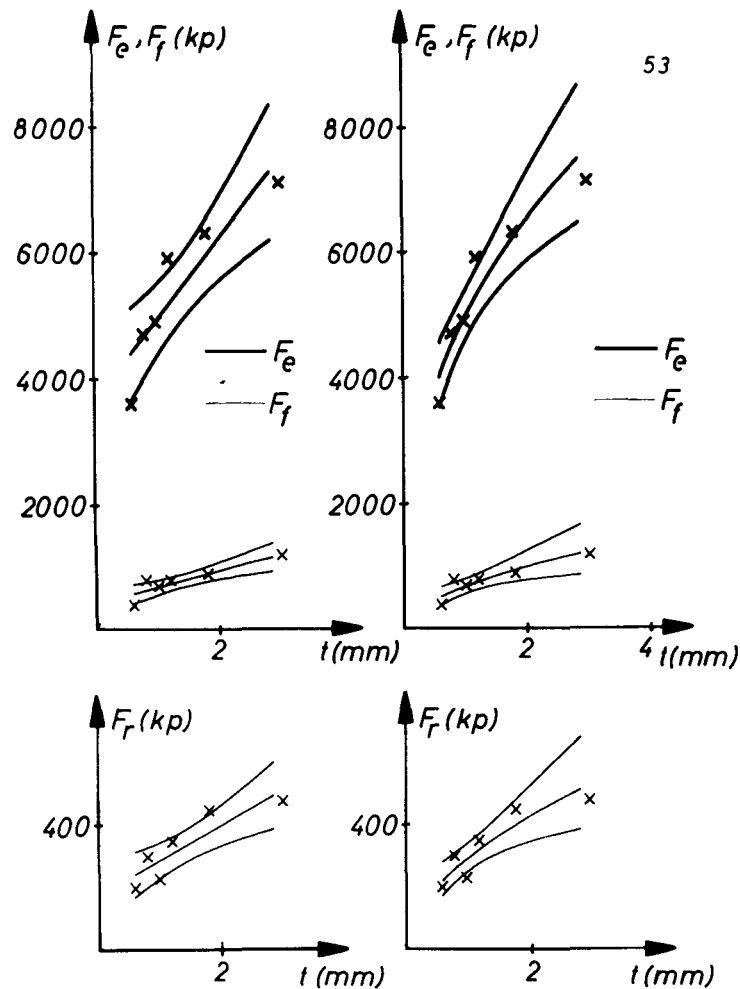
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Confection d'une entaille.

Roche : Schiste quartzitique.

Largeur d'enlevure : 40 mm

Hauteur de redent : $s_1 = 20$ mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	1280	300	3610	490	0,39	0,067	4900	19 ⁰	362	213	1586
F_f	265	63	428	100	0,55	0,14	685	58	16,0	14,6	67,8
F_r	113	30	175	48	0,54	0,13	287	21	3,55	2,89	12,9

Annexe 8.113

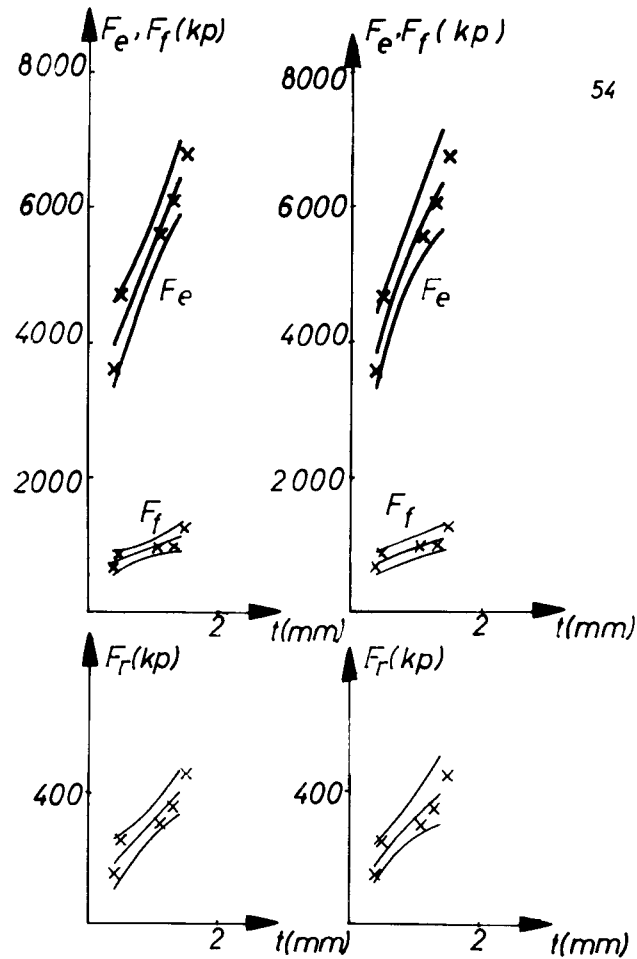
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Confection d'une entaille.

Roche : Schiste quartzitique.

Largeur d'enlevure : 40 mm

Hauteur de redent : $s_1 = 30$ mm



54

Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^2 \cdot a'_2 + t \cdot a'_1$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	2470	370	2980	390	0,40	0,066	5600	210	133	131	1553
F_f	394	110	600	120	0,33	0,099	1010	56	13,1	14,6	46,8
F_r	215	45	93	47	0,64	0,14	314	26	1,95	2,13	12,5

Annexe 8.114

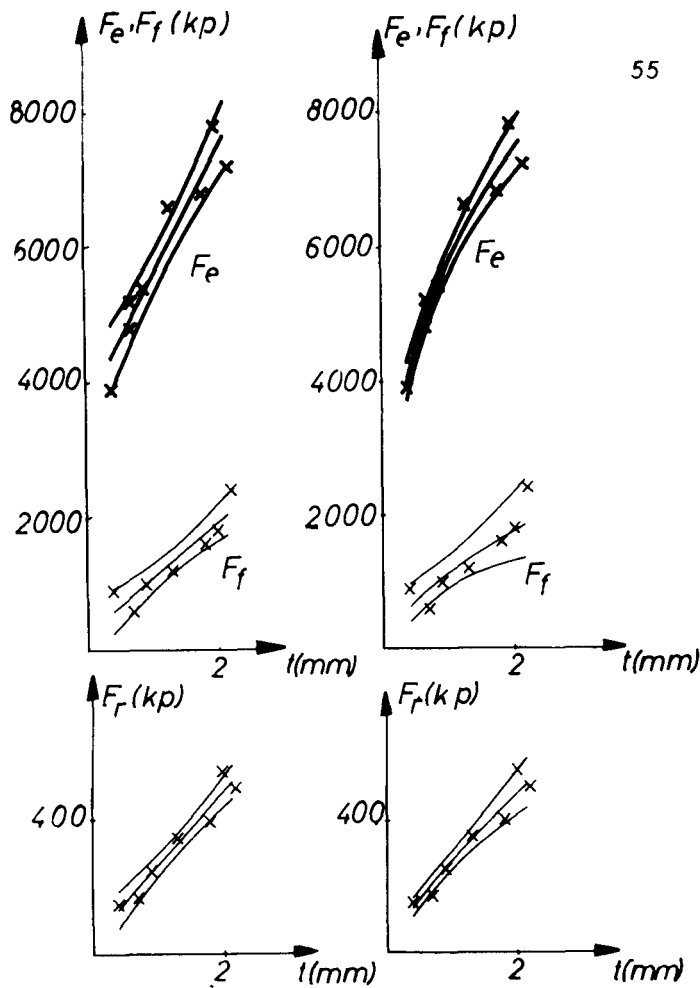
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Confection d'une entaille.

Roche : Schiste quartzitique.

Largeur d'enlèvement : 40 mm

Hauteur de redent : $s_1 = 40$ mm



55

Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	1880	240	3610	330	0,37	0,031	5660	100	188	112	1788
F_f	827	140	257	210	0,63	0,17	1130	120	61,7	94,0	379
F_r	219	23	47	35	0,79	0,084	273	14	1,65	1,79	24,3

Annexe 8.121

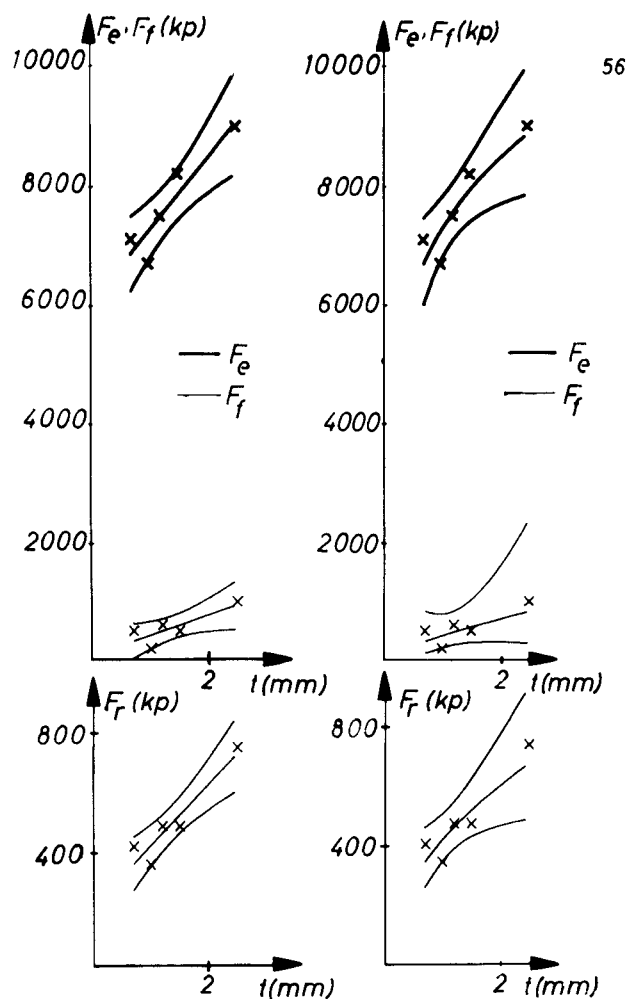
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Confection d'une entaille.

Roche : Schiste quartzitique.

Largeur d'enlèvement : 60 mm

Hauteur de redent : $s_1 = 20$ mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINEAIRE	PARABOL.	
F_e	1220	280	6000	430	0,22	0,063	7270	220	156	181	835
F_f	343	130	85	200	0,75	0,55	417	110	35,4	42,5	83
F_r	209	42	205	63	0,52	0,16	423	35	3,37	5,10	23,4

Annexe 8.122

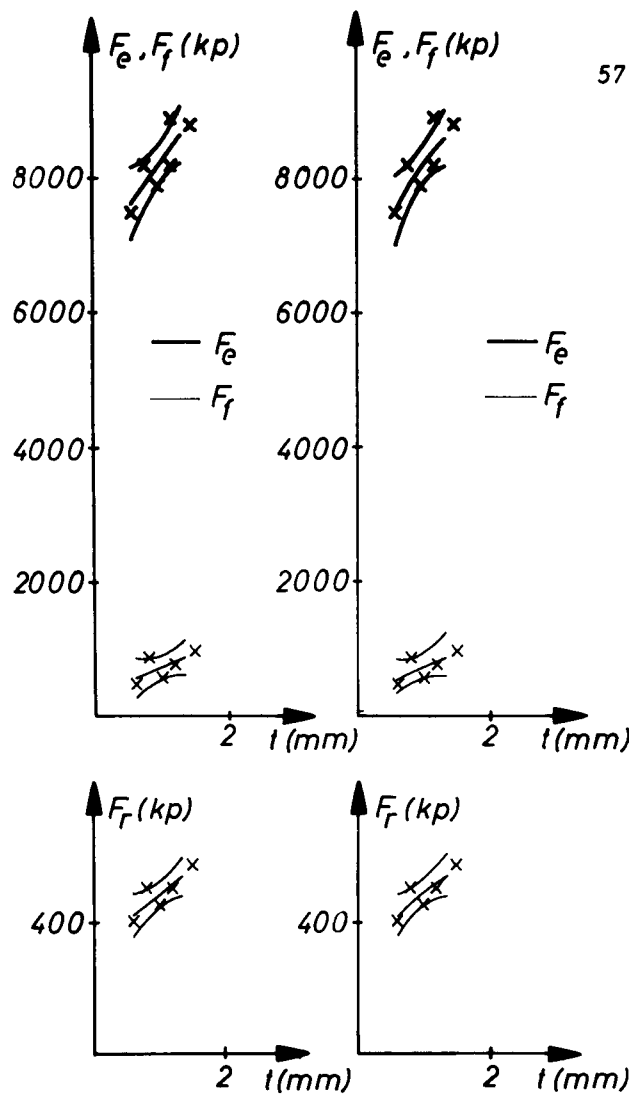
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Confection d'une entaille.

Roche : Schiste quartzitique.

Largeur d'enlèvement : 60 mm

Hauteur de redent : $s_1 = 40$ mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINEAIRE	PARABOL.	
F_e	1360	460	6810	500	0,16	0,053	8220	130	112	109	283
F_f	418	240	333	250	0,57	0,32	748	78	28,9	29,2	43
F_r	156	52	323	56	0,32	0,11	485	17	1,36	1,40	4,03

Annexe 8.123

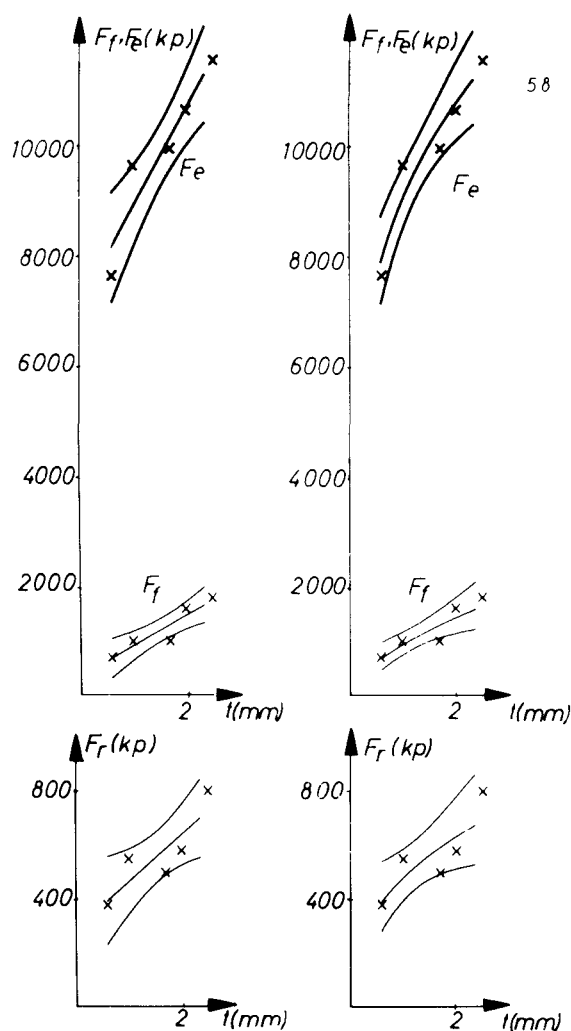
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Confection d'une entaille.

Roche : Schiste quartzitique.

Largeur d'enlevure : 60 mm

Hauteur de redent : $s_1 = 60$ mm



Compensation par droites

Compensation par paraboles

$$F = a_1 t + a_2$$

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	1720	250	7030	600	0,25	0,043	8950	240	296	216	2103
F_f	559	130	347	220	0,61	0,15	941	87	39,6	47,6	212
F_r	173	58	291	99	0,39	0,13	479	41	7,98	9,42	23,5

Annexe 8.211

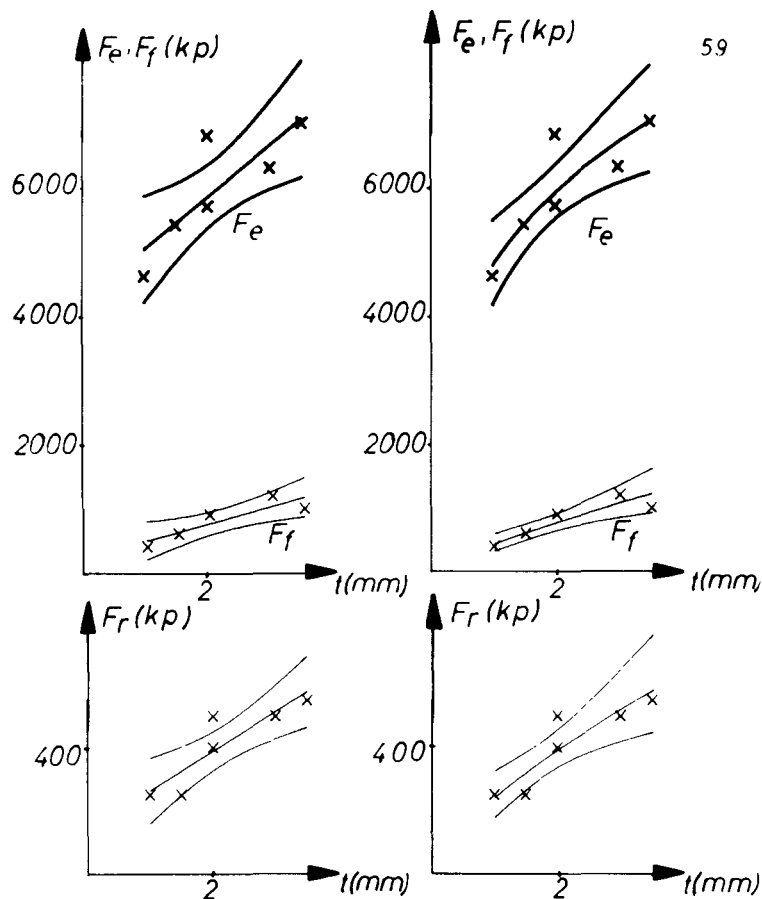
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Confection d'une entaille.

Roche : Grès de la Ruhr.

Largeur d'enlevure : 40 mm

Hauteur de redent : $s_1 = 10$ mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	815	260	4200	620	0,30	0,079	4770	300	313	255	827
F_f	274	80	216	190	0,81	0,16	433	58	28,0	27,0	102
F_r	125	33	137	77	0,70	0,17	239	33	4,84	4,52	17,4

Annexe 8.212

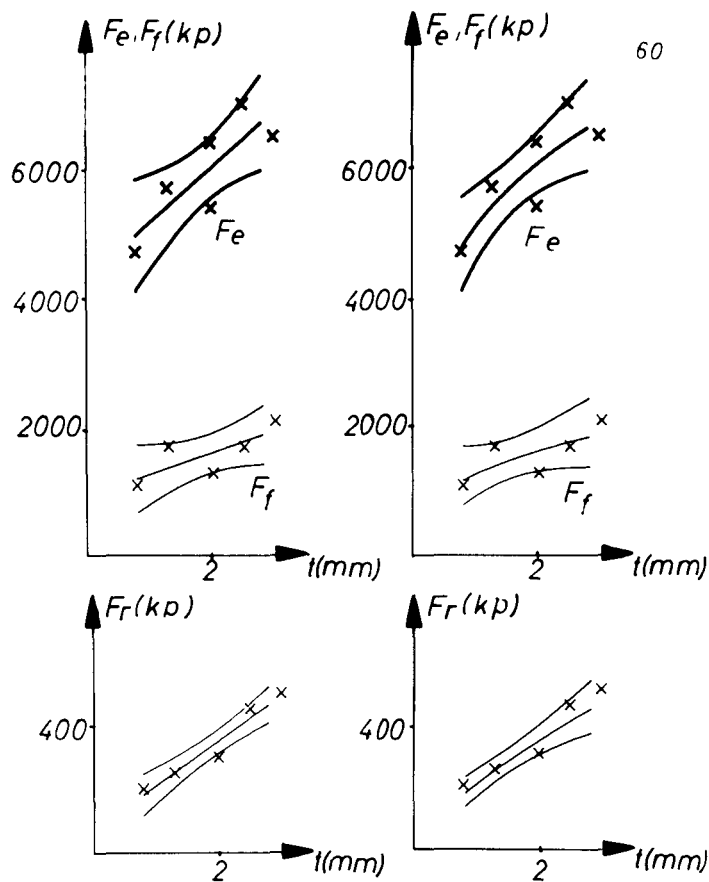
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Confection d'une entaille.

Roche : Grès de la Ruhr.

Largeur d'enlèvement : 40 mm

Hauteur de redent : $s_1 = 20$ mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINEAIRE	PARABOL.	
F_e	872	300	4260	610	0,26	0,077	5080	280	284	254	707
F_f	340	160	926	330	0,36	0,17	1260	160	80,9	85,8	152
F_r	141	20	67	41	0,69	0,11	218	18	1,27	1,81	16,8

Annexe 8.213

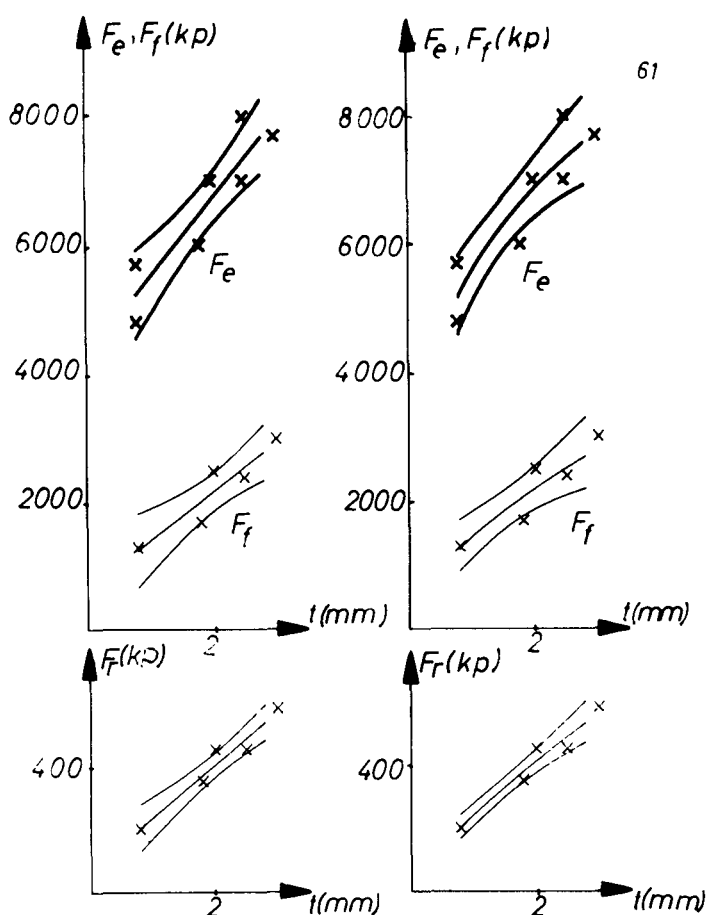
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Confection d'une entaille.

Roche : Grès de la Ruhr.

Largeur d'enlevure : 40 mm

Hauteur de redent : $s_1 = 30$ mm



Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

Compensation par paraboles

$$F = t^2 \cdot a'_1 + a'_2$$

Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	1220	210	4250	500	0,30	0,062	5530	260	264	260	1317
F_f	763	170	638	360	0,61	0,14	1430	150	79,6	90,6	457
F_r	166	22	69	47	0,78	0,083	236	15	1,34	1,36	19,9

Annexe 8.214

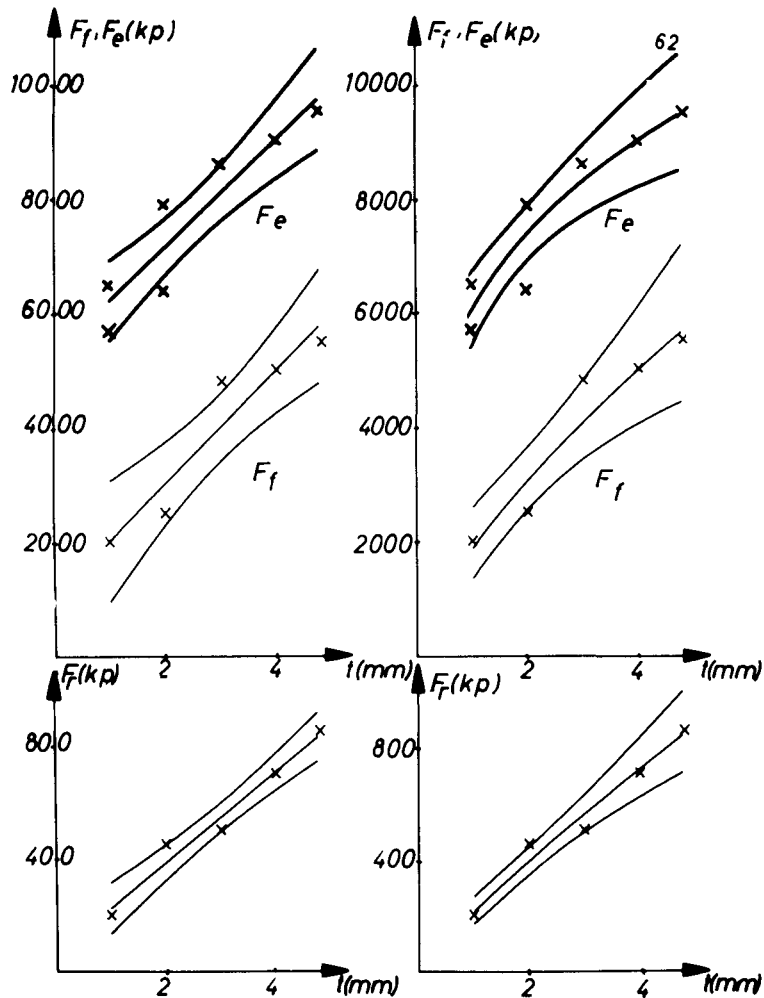
Composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de pénétration. Valeurs mesurées, courbes de compensation et domaines de confiance (S = 90 %).

Attaque de la roche : Confection d'une entaille.

Roche : Grès de la Ruhr.

Largeur d'enlevure : 40 mm

Hauteur de redent : $s_1 = 40$ mm



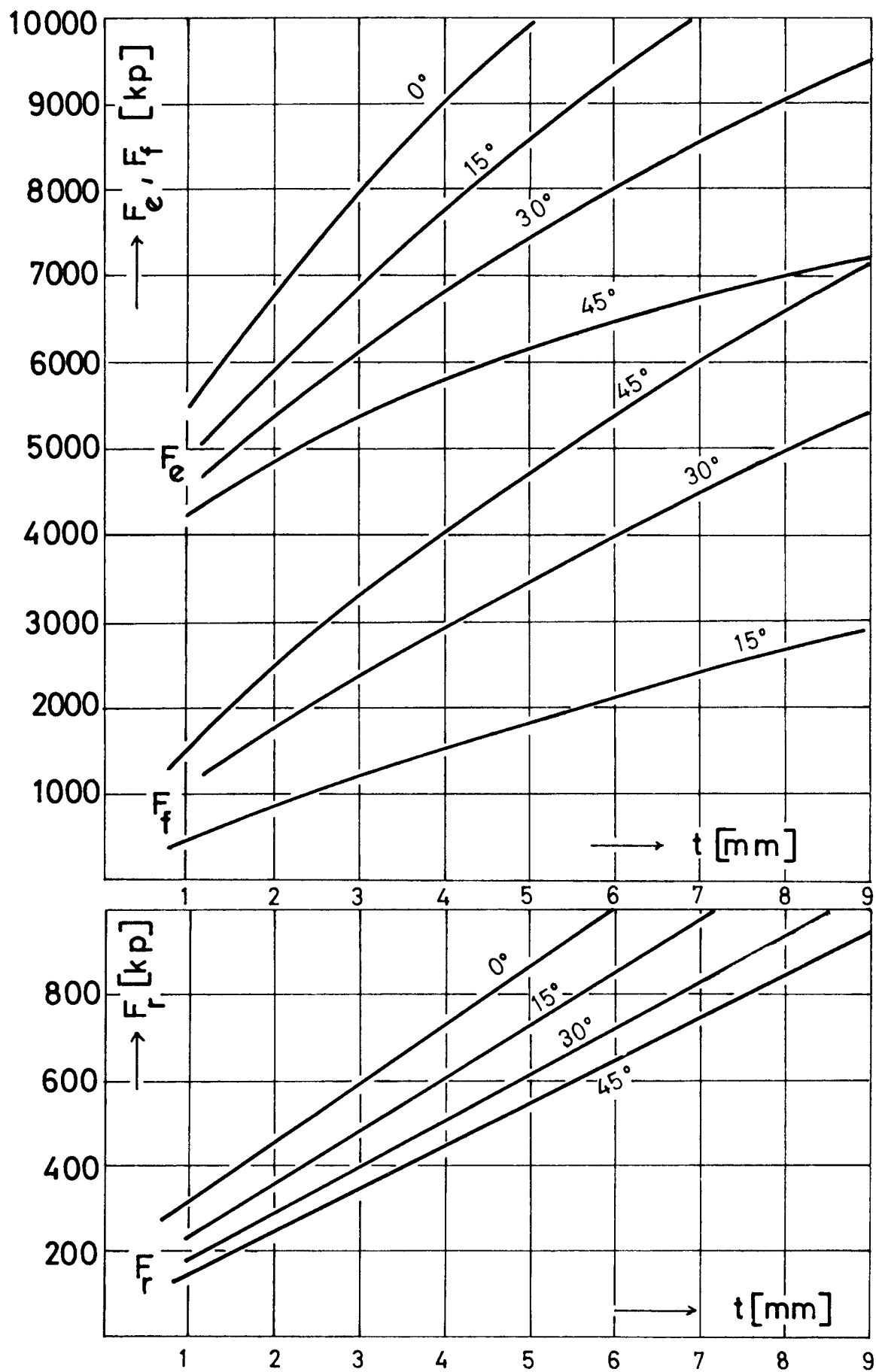
Compensation par droites

$$F = a_1 t + a_2$$

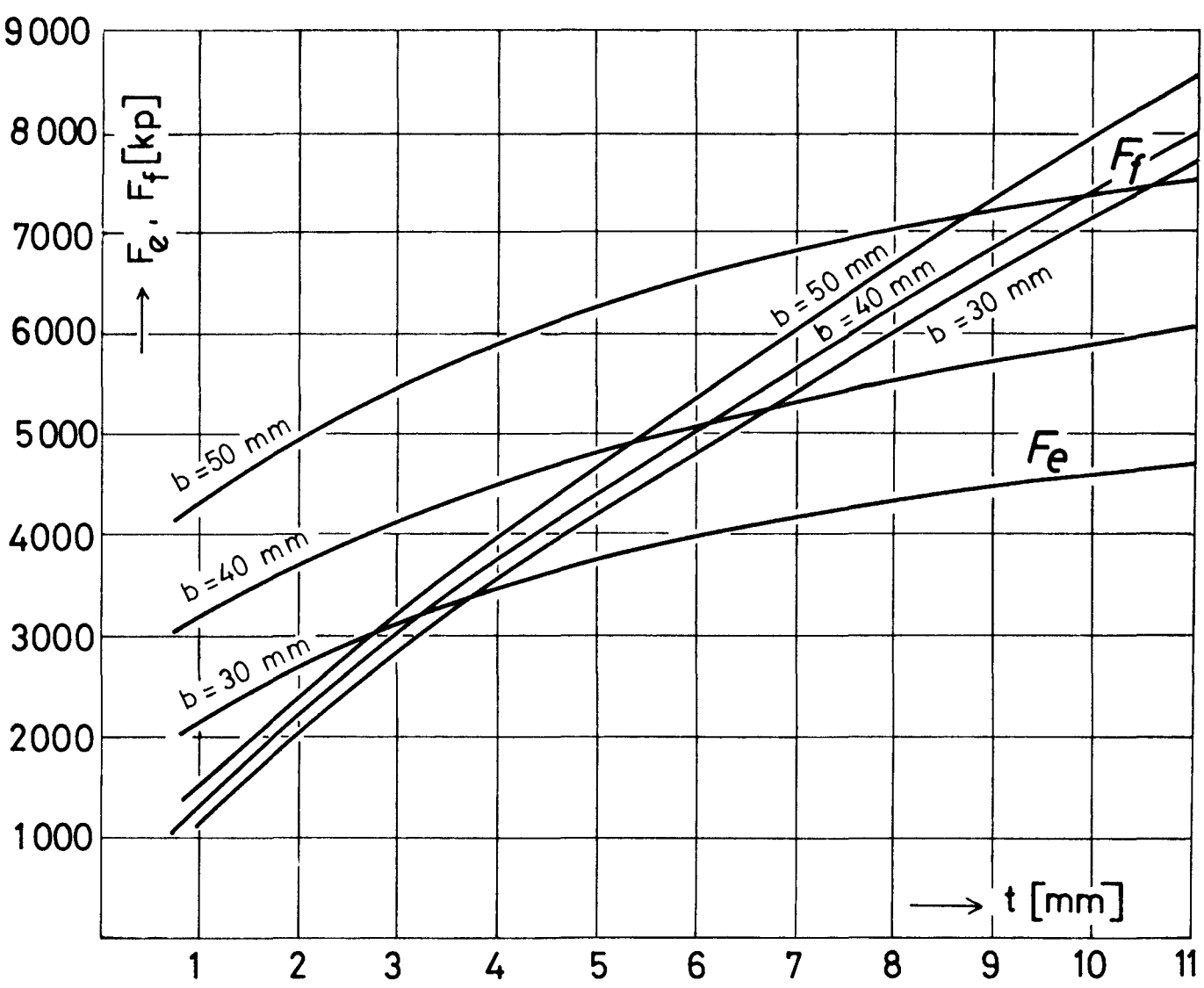
Compensation par paraboles

$$F = t^{a'_1} \cdot a'_2$$

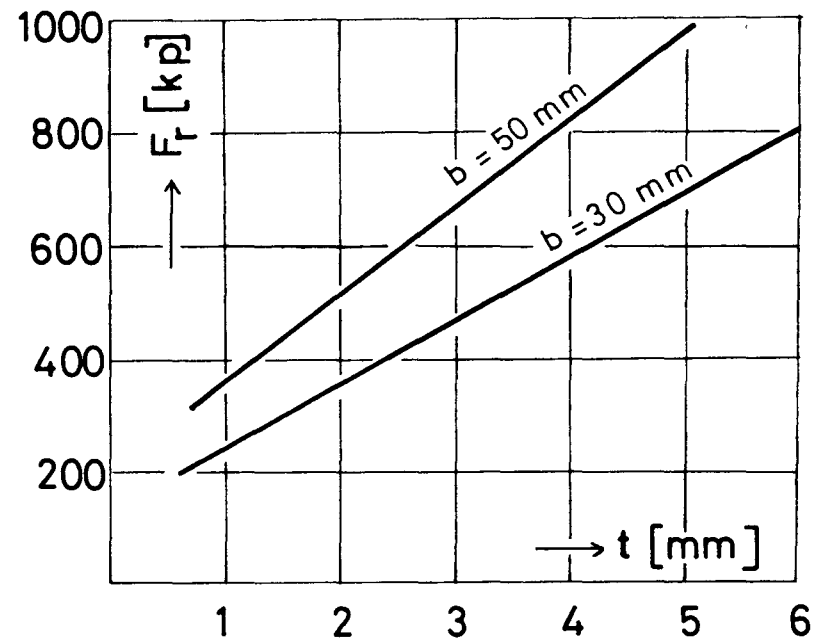
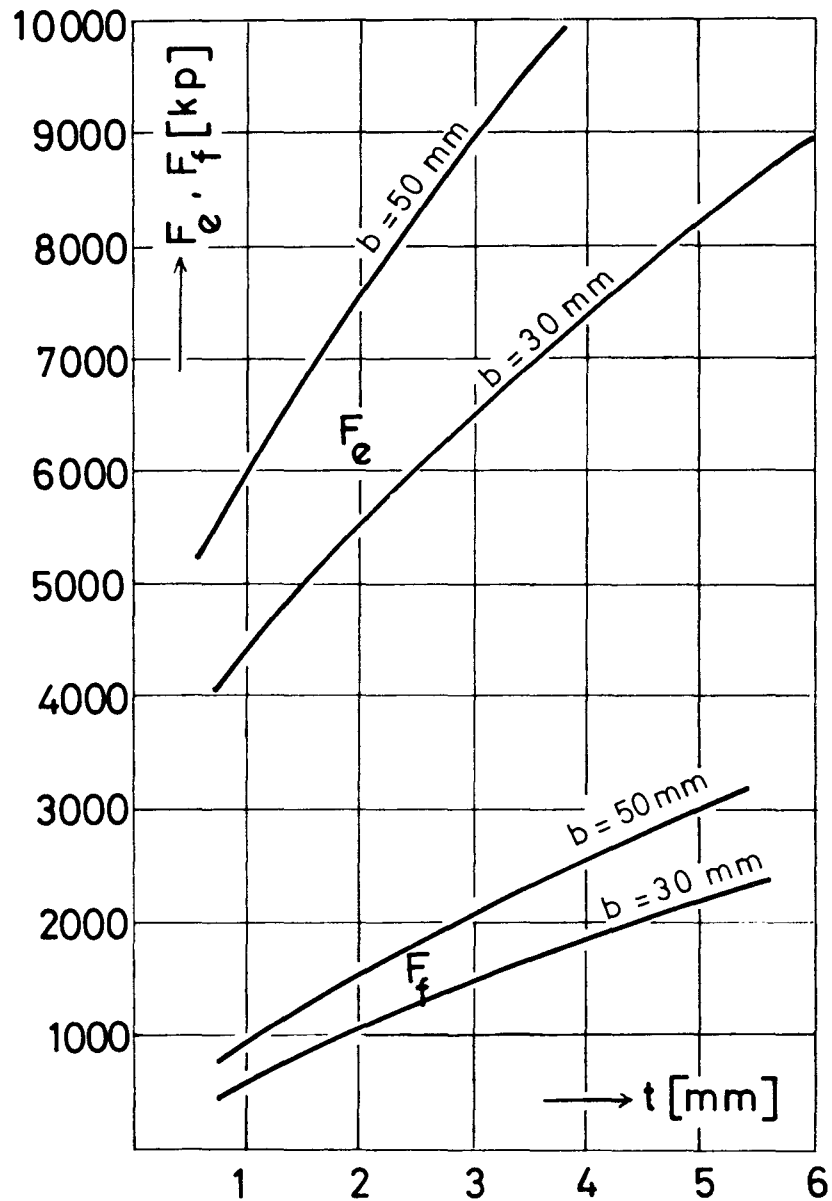
Grandeurs mesurées	Coefficients de compensation et leurs erreurs moyennes								Dispersion des valeurs mesurées $S^2/10^3$		
	Compensation linéaire				Compensation parabolique				AUTOUR DES COURBES DE COMPENSATION		AVANT LA COMPENSATION
	a_1	ma_1	a_2	ma_2	a'_1	ma'_1	a'_2	ma'_2	LINÉAIRE	PARABOL.	
F_e	931	160	5280	480	0,29	0,054	6000	320	361	330	2149
F_f	995	130	1010	610	0,70	0,12	1870	260	326	296	2533
F_r	161	16	62	52	0,87	0,087	210	20	2,38	2,39	61,8



Annexe 9.1 : Effort de pénétration, effort de dégagement interne et effort de roulement pour différents angles de cône
Largeur d'enlèvement : 50 mm

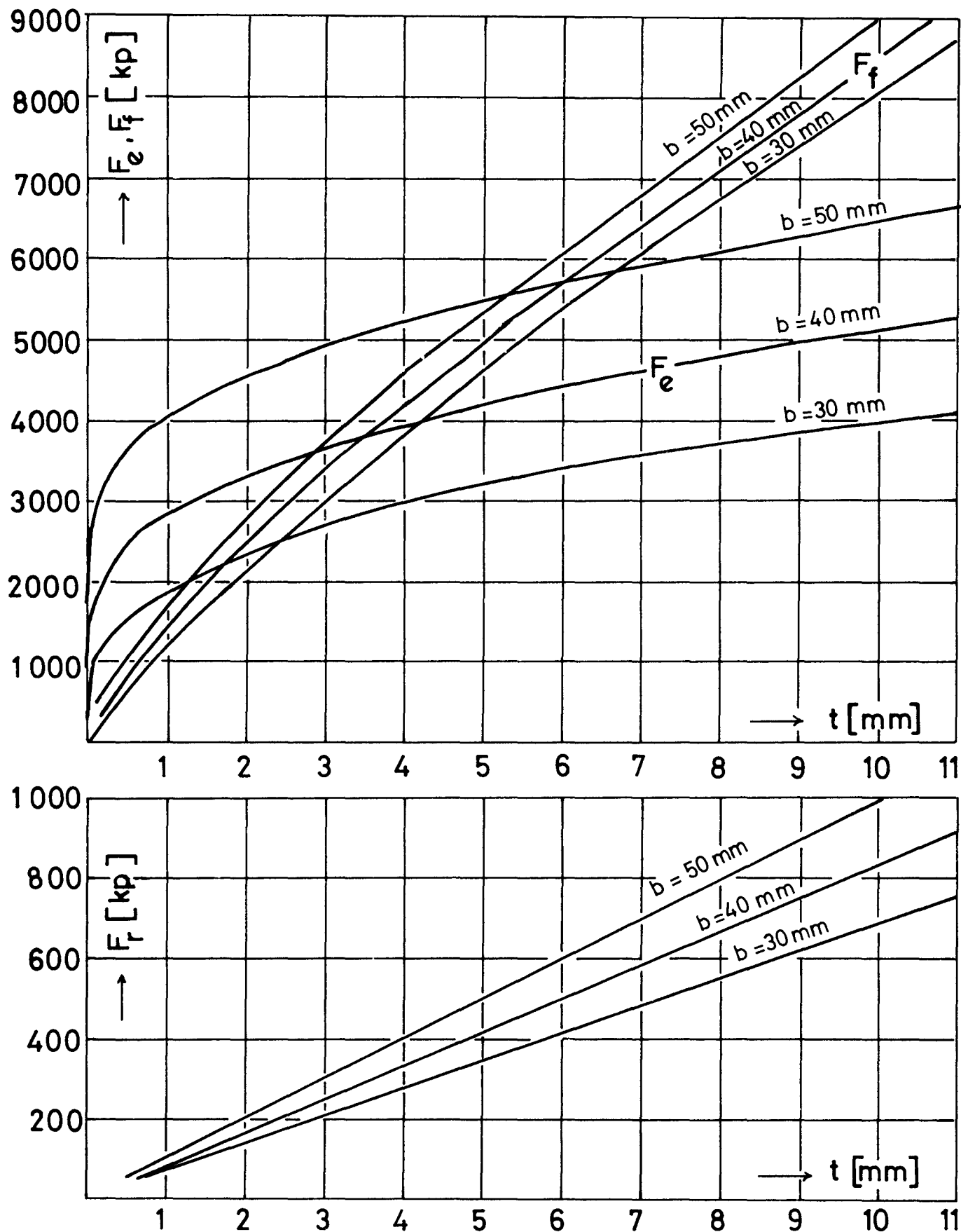


Annexe 9.2 : Effort de pénétration et effort de dégagement interne pour différentes largeurs d'enlèvement b
Angle du cône : 45°



Annexe 9.3 : Effort de pénétration, effort de dégagement interne et effort de roulement lors de la confection d'une entaille de 30 et de 50 mm de large

Hauteur de redent des molettes coupantes voisines : $s_1 = \frac{b}{2}$



Annexe 9.4 : Effort de pénétration, effort de dégagement interne et effort de roulement pour différentes largeurs d'enlèvement b lors du fraisage en présence d'une face libre

**Publications technico-économiques de la Commission
des Communautés européennes dans le domaine du charbon**

Doc n°	Titre	Année	Langues	Prix en unités de compte
9591/1/59/1	Creusement rapide de galeries dans le rocher et dans le charbon	1959	a	2,50
6740/2/60/1	Mesures de rationalisation dans les charbonnages	1960	a,f	2,50
11848/2/66/1	Mesures de rationalisation et de modernisation dans les charbonnages des bassins de la Sarre et de la Lorraine	1966	a,f	3,00
	Le grisou et les moyens de le combattre			
13909	Deuxième journée d'information du 10 février 1967 à Luxembourg	1967	a,f	2,50
	Réunion technique de la commission de recherches charbon du 10 au 12 avril 1967 à Essen	1967	a,f	2,50
	Recueils de recherches charbon			
11466/2/66/1	N° 1 Chargement des fours à coke avec du charbon prechauffé	1966	a,f,i,n	1,50
11734/2/66/1	N° 2 Combustion du charbon	1966	a,f,i,n	1,50
11735/2/66/1	N° 3 Inflammation et combustion de charbon gras sur grille	1966	a,f,i,n	1,50
12546/2/66/1	N° 4 Mécanisation du creusement au rocher — Machine de creusement des galeries SVM 40	1966	a,f	1,50
12633/2/66/1	N° 5 Chaudière «Package» à tube d'eau à grille oscillante	1966	a,f	1,50
3933	N° 6 Chaudière «Package» à tube d'eau alimentée au charbon pulvérisé	1966	a,f	1,50
3934	N° 7 Dégagements instantanés I — CERCHAR	1966	a,f	1,50
3935	N° 8 Dégagements instantanés I — INICHAR	1966	a,f	1,50
3931	N° 9 Mise à l'épreuve de barrages et d'arrêts-barrages	1967	a,f	1,50
3936	N° 10 Télécontrôle et télécommande en taille havée	1967	a,f	1,50
4488	N° 12 Désulfuration des gaz de fumées des foyers au charbon	1969	a,f	1,50
4489	N° 13 Contraintes, mouvements et formation de cassures dans les roches encaissant les galeries en veine	1969	a,f,n	1,50
4490	N° 14 Chaudière de chauffage central à coke	1969	a,f,n	1,50
15837	N° 15 Étude sur le tirage des cheminées sous l'influence de rafales de vent	1970	a,f,n	2,50
	N° 17 Soutènement mécanisé I — Steinkohlenbergbauverein	1969	a,f	2,50
16085	N° 18 Télécommande et automatisations des travaux souterrains dans les houillères du Royaume-Uni et de la Communauté européenne du charbon et de l'acier (Situation 1968)	1970	a,f	1,50
4491	N° 20 Recherches fondamentales sur la chimie et la physique des charbons et des coques	1968	a,f	3,50
4543	N° 21 Commandes hydrostatiques pour des installations d'abattage de charbon	1968	a,f,n	1,50
	N° 22 Recherches sur les pressions de terrains I — Steinkohlenbergbauverein	1969	a,f	1,50
4492	N° 23 Recherches sur les pressions des terrains I — CERCHAR — Rapport général	1968	a,f	1,50
	N° 24 Recherches concernant les mouvements de terrain au voisinage des galeries	1969	a,f,n	1,50
	N° 25 Mécanique des terrains houillers dans le cas de déformations planes	1969	a,f	5,50
4493	N° 26 Étude concernant le gisement, le dégagement du grisou et les moyens de le combattre, effectuée dans les mines des Pays-Bas	1968	a,f,n	1,50
4494	N° 27 Étude des pressions de terrain en relation avec les dégagements instantanés de grisou	1969	a,f,n	1,50
	N° 28 Cadres articulés sur piles de bois	1969	f,n	1,00
15791	N° 29 Recherches fondamentales sur la chimie et la physique des charbons et des coques — Rapport de synthèse II 1966-1967	1969	a,f	1,50
16353	N° 30 Essais d'explosion avec des arrêts-barrages et des barrages d'isolement	1970	a,f	2,50
16409	N° 31 Expertise sur le creusement des galeries au rocher	1970	a,f	2,50
16490	N° 32 Utilisation des cendres volantes et du mâchefer de générateurs de vapeur chauffés au charbon	1970	a,f	1,50
16743	N° 33 La recherche charbonnière encouragée par la Communauté et ses résultats	1970	a,f,i,n	1,00
16878	N° 34 Le gisement et le dégagement du grisou I — 1962-1968 — StBV	1971	a,f	2,50
16879	N° 35 Le gisement et le dégagement du grisou I — 1963-1968 — INIEX	1971	a,f	2,50
16880	N° 36 Recherches fondamentales sur la chimie et la physique des charbons et des coques — III 1967-1969	1970	a,f	3,50
5641	N° 37 Comportement des toits, humidification et soutènement mécanisé	1971	a,f	3,00
5610	N° 38 Étude sur la combustion du charbon — Rapport de synthèse 1962-1970 — CERCHAR	1971	a,f	3,50
5846	N° 39 Foration par enlèvement	1971	a,f	8,00
5518	N° 40 Rapport d'activité 1970 sur les recherches charbonnières encouragées par la Communauté	1971	a,f	1,50
5598	N° 41 Dégagements instantanés de méthane et de charbon — Rapport de synthèse 1962-1969 — CERCHAR	1971	a,f	5,00
5686	N° 42 Télécommande et télécontrôle d'une taille à rabot et soutènement marchant	1971	a,f	4,00
5845	N° 43 Amélioration du climat dans les chantiers d'abattage, StBV	1971	a,f	4,50
5872	N° 44 Propagation des ondes radioélectriques dans les chantiers souterrains, INIEX	1972	f	2,50
5873	N° 45 Augmentation de la production de coke par régularisation de la charge des fours — Rapport final 1970-1972 — StBV	1972	a,f	3,00
5976	N° 45bis — Possibilités d'accroissement de la productivité dans la cokéfaction de la houille — Rapport final 1968-1972 — CERCHAR	1972	a,f	2,50
EUR 4520	Technique et évolution dans le domaine de la cokéfaction	1970	a,f,e	14,00
EUR 4533	Pression des terrains et soutènement dans les mines	1970	a,f	16,00
EUR 4641	Recherche charbonnière — Application à la technique minière — Base pour nouveaux produits	1971	a,f	5,00
EUR 4670	Maîtrise du dégagement grisouteux — Amélioration du climat	1971	a,f	15,00

Des exemplaires supplémentaires du présent recueil tout comme les publications mentionnées plus haut peuvent être commandées à

Office des publications officielles des Communautés européennes
Case postale 1003 Luxembourg 1

